



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JENNI LÄTTI

ARVOKOHTTEIDEN PUISTEN KATTORISTIKOIDEN VAHVISTAMI-  
NEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Pentti  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekun-  
taneuvoston kokouksessa 9. mar-  
raskuuta 2016

## TIIVISTELMÄ

**JENNI LÄTTI:** Arvokohteiden puisten kattoristikoiden vahvistaminen  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 92 sivua, 20 liitesivua  
Huhtikuu 2017  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Rakennesuunnittelu  
Tarkastaja: Professori Matti Pentti

**Avainsanat:** kattoristikko, puuliitos, vahvistaminen, arvokohde

Suomessa puurakentamisella on pitkä historia. Puuta on jo vuosisatojen ajan käytetty kantavien kattorakenteiden rakennusmateriaalina. Puurakentamistaito onkin ollut Suomessa ensiluokkaista. Arvokohteita on säilynyt Suomessa melko paljon ja niiden säilyminen on kulttuuriperinnön kannalta erittäin tärkeää. Arvokohteiden puisten kattoristikoiden kulttuurihistoriallinen arvo voidaan säilyttää vahvistamalla ristikoita niiden uusimisen sijaan. Perinteinen puurakentaminen eroaa nykyrakentamisesta merkittävästi, joten rakenteiden tarkastelujen ja korjaamisen kannalta on tärkeää perehtyä perinteisten liitosten ja kattokannattajien ominaispiirteisiin.

Tässä tutkimuksessa perehdyttiin puurakentamisen suomalaisiin perinteisiin kattoristikoiden näkökulmasta. Työssä selvitettiin vanhojen kattoristikoiden ominaispiirteitä ja vaurioitumistapoja sekä tapoja rakenteen kantavuuden arvioimiseksi. Työn päätavoitteena oli löytää ratkaisuja arvokohteiden puisten kattoristikoiden vahvistusmenetelmiksi. Kirjallisuusselvityksen avulla koottua tietoa erilaisista vahvistusmenetelmistä täydennettiin esimerkkikohteilla, joissa arvokohteiden kattorakenteisiin on tehty vahvistuksia. Lisäksi kirjallisuusselvityksellä saatuja tuloksia sovellettiin työn esimerkkikohteena olevan Aleksanterin teatterin kattorakenteiden vahvistusmenetelmän suunnitteluun.

Kattoristikoiden biologinen tai kuormitusperäinen vaurioituminen saattaa johtaa ristikoiden vahvistamistarpeeseen. Vanhan ristikon kantavuutta voidaan arvioida muodostamalla ristikon sauvojen todellisiin lujuuksiin perustuvia laskennallisia rakennemalleja, joissa huomioidaan liitosten voimansiirtokyky sekä ristikon vauriot. Kattoristikon kapasiteettia saadaan kasvatettua esimerkiksi vahvistamalla sen liitoksia ja yksittäisiä sauvoja. Korjausten suunnittelussa on kiinnitettävä huomiota erityisesti uusien ja vanhojen rakenneosien yhteensopivuuteen mekaanisten sekä lämpö- ja kosteusteknisten ominaisuuksien kannalta. Ristikon vaurioituneita osia voidaan korvata uusilla puurakenteilla, jolloin vanhaa rakennetta voidaan säästää mahdollisimman paljon. Samalla ristikon historiallinen arvo säilyy. Siirtämällä taas vaurioituneen ristikon kuormat uusille kantaville rakenteille voidaan vanha rakenne säilyttää niin sanotusti museokäytössä ja se on myöhemmin palautettavissa. Arvokohteissa vahvistustavan valintaa ohjaavat suojelumääräykset, jotka asettavat reunaehdoja korjausrakentamiselle.

## ABSTRACT

**JENNI LÄTTI:** Strengthening of wooden roof trusses in buildings with historical value

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 92 pages, 20 Appendix pages

April 2017

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Design

Examiner: Professor Matti Pentti

**Keywords:** roof truss, wood joint, strengthening, buildings with historical value

In Finland timber construction has a long history. Timber has been used in load-bearing roof structures for centuries. The knowledge of timber construction has been high-class in Finland already in the past. There are still many buildings in Finland with historical value that have been preserved. A continuing preservation of these buildings is of great importance concerning their cultural-historical heritage. Strengthening of wooden roof trusses in buildings with historical value is one of the ways to preserve the cultural-historical value of the trusses. The traditional timber construction differs significantly from the modern one so it is important to become acquainted with the attributes of traditional wood joints and the figures of traditional roof trusses.

The aim of this study is to get acquainted with the traditional timber construction in Finland related to the wooden roof trusses and to figure out damage mechanisms coupled with the methods for evaluating the load-bearing capacity of the old roof trusses. The main goal of this study is to find out solutions for strengthening the wooden roof trusses in buildings with historical value. The theory of this study is illustrated by two case examples in which strengthening of the old wooden roof trusses has been made. The results were applied to the repair design of the wooden roof trusses in the Alexander Theatre which is also a case example in this study.

The biological or mechanical damages may lead to the need of strengthening of wooden roof trusses. The load-bearing capacity of an old roof truss can be estimated by forming structural models which take into account the capacity of the wood joints and the possible damages of the truss. By strengthening the joints and single struts of the roof truss the capacity of the truss can be improved. In designing the repairs the different mechanical, heat and moisture properties of the old and new components have to be considered. One option is to replace damaged parts with new timber components. Thus the old structure can be saved as well as possible. By transferring the loads to the new load-bearing structure the old roof truss can be preserved in the building without visible repairs. Concerning the buildings with historical value the building preservation orders give direction for choosing the applicable strengthening methods and repairs of the old structures.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston maisterivaiheen opinnäytetyönä Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy:lle ja Senaatti-kiinteistöille. Haluan kiittää diplomityömahdollisuudesta ja mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta työni ohjaajaa Simo-Pekka Valtosta. Kiitos myös työni toimeksiantajalle Senaatti-kiinteistöille. Erityiskiitos kuuluu myös työni tarkastajalle ja ohjaajalle professori Matti Pentille avartavista näkemyksistä. Niistä tulee varmasti olemaan hyötyä myös myöhemmässä työelämässäni. Kiitos myös työkavereilleni Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy:ssä. Heiltä olen saanut hyviä vinkkejä ja neuvoja sekä kannustusta diplomityöprojektissani. Tällaisessa työpäikässä on upeaa jatkaa valmistumisen jälkeen. Haluan kiittää myös Simo Jauhijärveä mielenkiintoisesta työmaavierailusta hirsirakennustyömaalla sekä mielenkiintoisista yksityiskohdista hirsirakenteiden korjaamiseen liittyen.

Taakseni jää nyt pitkä opintojen taival, kun kuusi vuotta diplomi-insinööriopintoja tulee päätökseen. Opiskeluvuodet ovat olleet kasvattavia ja antoisia, mutta tuntuu hyvältä päästä työelämään mielenkiintoisten projektien pariin ja hyödyntämään opittua tietoa.

Suurimman kiitoksen haluan antaa vanhemmilleni, joiden pyyteetön tuki ja tsemppaus ovat olleet opinnoissani ensiarvoisen tärkeitä. Saamallani kasvatuksella on ollut merkittävä rooli tekemissäni valinnoissa. Haluan kiittää ystäviäni ja sisaruksiani myötäelämisestä opintieilläni. Kiitos myös kaikille uusille ystäville, joita opiskeluvuodet TTY:lla ovat minulle antaneet. Toivon ja uskon, että yhteinen taipaleemme jatkuu, vaikka tiemme Tampereen Hervannasta ovat erkaantuneet.

Turussa, 13.4.2017

Jenni Lähti



## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta .....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset.....	1
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	2
1.4	Työn rakenne.....	2
2.	PUISET KATTORISTIKOT .....	3
2.1	Puu rakennusmateriaalina .....	3
2.2	Kattoristikkorakenteiden historia .....	9
2.2.1	Varhainen historia .....	9
2.2.2	Kirkot ja tornit.....	9
2.2.3	Yleiset rakennukset .....	12
2.3	Kattoristikoiden perinteiset liitostavat .....	17
2.3.1	Perinteisten puuliitosten ominaispiirteet.....	17
2.3.2	Pusku- ja lapaliitos .....	19
2.3.3	Loviliitos .....	21
2.3.4	Lohenpyrstöliitos .....	24
2.3.5	Vinokulmainen loviliitos.....	26
2.4	Kattoristikon rakenne ja toimintatapa .....	28
3.	KATTORISTIKOIDEN VAURIOITUMINEN .....	30
3.1	Yleisimmät vaurion aiheuttajat .....	30
3.2	Puun biologinen vaurioituminen .....	30
3.3	Kuormitusperäinen vaurioituminen .....	32
4.	VANHOJEN PUURAKENTEIDEN LUJUUDEN ARVIOINTI JA TUTKIMINEN .....	35
4.1	Tarvittavat taustatiedot ja havainnot .....	35
4.2	Rakenteellisen turvallisuuden tarkastelu .....	35
4.2.1	Vesikattorakenteiden kunnon tarkastaminen .....	36
4.2.2	Vanhan kattoristikon kantavuuden arvioiminen .....	36
4.3	Puurakenteiden lujuuden arviointi .....	37
4.4	Arvokohteiden puurakenteiden ainetta rikkomattomat tutkimusmenetelmät ..	40
5.	KATTORISTIKON VAHVISTUSMENETELMÄT .....	46
5.1	Näkökulmia kattoristikoiden vahvistamisesta.....	46
5.2	Vaurioituneiden osien uusiminen.....	47
5.3	Ristikön lisävahvistukset.....	49
5.4	Uudet kantavat rakenteet.....	52
6.	ARVOKOhteiden KORJAUSTYÖT.....	54
6.1	Korjausrakentamisen säädökset .....	54
6.2	Arvorakennusten vaaliminen.....	54

6.2.1	Suojelunäkökulma.....	54
6.2.2	Museovirasto.....	55
6.2.3	Rakennushistoriaselvitys.....	56
7.	CASE-ESIMERKIT.....	57
7.1	Savitaipaleen kirkko.....	57
7.2	Sipoon vanha kirkko.....	59
8.	CASE: ALEKSANTERIN TEATTERIN KATTORISTIKOIDEN VAHVISTAMINEN .....	62
8.1	Rakennuksen historia .....	63
8.2	Kantavat kattorakenteet.....	65
8.2.1	Katsomon kattoristikot.....	66
8.2.2	Savunpoistohormin viereiset kattoristikot .....	68
8.2.3	Kattorakenteiden vahvistukset ja korjaukset.....	71
8.2.4	Ristikoiden vaurioituminen.....	73
8.2.5	Vauriokehityksen seuranta.....	74
8.3	Ristikoiden vahvistaminen .....	77
8.3.1	Kantokyvyn ylittyminen .....	77
8.3.2	Vahvistusmenetelmä .....	79
8.3.3	Kertopuupalkkien mitoitus.....	81
8.3.4	Vetotankojen mitoitus .....	84
9.	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT .....	86
	LÄHTEET.....	88

LIITE A: ALEKSANTERIN TEATTERI, KATSOMON KATTOKANNATTAJAIN KUORMITUKSET

LIITE B: ALEKSANTERIN TEATTERI, KATSOMON VANHAN KATTORISTIKON RAKENNEANALYYSI (ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS)

LIITE C: ALEKSANTERIN TEATTERI, KATSOMON VANHAN KATTORISTIKON SAUVOJEN KESTÄVYYSTARKASTELU

LIITE D: ALEKSANTERIN TEATTERI, KEHÄN K-1 RAKENNEANALYYSI (ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS)

LIITE E: ALEKSANTERIN TEATTERI, KATSOMON UUSIEN KATTOKANNATTAJAIN SIJAINTI

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

$\alpha$	jännitysten ja puurakenteen syysuunnan välinen kulma	°
$\gamma_M$	materiaaliominaisuuden osavarmuusluku	-
$\rho$	materiaalin tiheys	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_c$	puristusjännitys	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_m$	taivutusjännitys	N/mm <sup>2</sup>
$\tau$	leikkausjännitys	N/mm <sup>2</sup>
$b$	rakenneosan leveys	mm
$b_{ef}$	rakenneosan tehollinen leveys	mm
$d$	rakenteen halkaisija	mm
$f_c$	puristuslujuus	N/mm <sup>2</sup>
$f_m$	taivutuslujuus	N/mm <sup>2</sup>
$f_t$	vetolujuus	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ub}$	ruuvien myötöraja	N/mm <sup>2</sup>
$E$	kimmokerroin	N/mm <sup>2</sup>
$E_d$	dynaaminen kimmokerroin	N/mm <sup>2</sup>
$h$	rakenneosan korkeus	mm
$H, N, S, V$	voimakomponentteja	N
$I$	jäyhyysmomentti	mm <sup>4</sup>
$k_{cr}$	halkeamien vaikutuksen huomioiva kerroin	-
$k_{c,90}$	puun syysuuntaa vastaan kohtisuorien jännitysten huomioiva kerroin	-
$k_{def}$	virumakerroin	-
$k_{mod}$	kuorman keston ja kosteuden vaikutuksen huomioiva kerroin	-
$M$	ulkoisista kuormista aiheutuva taivutusmomentti	Nmm
$M_0$	sisäisistä kuormista aiheutuva taivutusmomentti	Nmm
$t_v$	loviiliitoksen loven syvyys	mm
$v$	taipuma	mm
$V$	aallon nopeus	m/s
$W$	taivutusjäykkyys	mm <sup>3</sup>
$X$	materiaalin lujuusominaisuuden arvo	N
C	havupuun lujuusluokkatunnus	
D	lehtipuun lujuusluokkatunnus	
EN338	rakennesahatavaran lujuusluokittelustandardi	
RHS	rakennushistoriaselvitys	

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Puuta on käytetty Suomessa rakentamisessa jo vuosisatojen ajan. Puu on kevyt, mutta kestävä rakennusmateriaali, ja sillä voidaan vastaanottaa sekä puristus- että vetorasitukset. Se on suosittu materiaali myös saatavuutensa ja ympäristöarvojen ansiosta. Nykypäivänä muut materiaalit ovat osittain syrjäyttäneet puun kantavissa kattorakenteissa, mutta vanhoissa rakennuksissa puu on lähes yksinomaan ainoa kattokannattajissa käytetty rakennusmateriaali.

Perinteisessä puurakentamisessa käytetyt liitostavat ja rakennemallit eroavat olennaisesti nykyaikaisesta rakentamisesta. Perinteisen sahatavaran ovat syrjäyttäneet erilaiset insinööripuutuotteet, ja käsityönä veistetyt kirvesmiesliitokset ovat työläytensä vuoksi jääneet nykyaikaisten liitostyyppien varjoon. Korjausrakentaminen on nykypäivän kasvava trendi, ja syntyy jatkuva tarve korjata vanhaa rakennuskantaa. Korjausrakentamisessa on olennaista ymmärtää olemassa olevan rakenteen liitosten ja rakenneosien toimintaa, jotta korjaustoimenpiteet osataan suunnitella oikein.

Tässä diplomityössä perehdytään erityisesti arvokohteiden puisten kattoristikoiden vahvistamiseen. Arvokohteiden erikoispiirteinä ovat suojelumääräykset, jotka velvoittavat vaalimaan kohteen kulttuurihistoriallista arvoa korjaus- ja muutostöiden yhteydessä. Diplomityössä käsitellään case-esimerkkinä Helsingissä sijaitsevan Aleksanterin teatterin puisten kattoristikoiden vahvistamista. Teatterin vanhassa osassa ovat säilyneet alkuperäiset, 1800-luvulta peräisin olevat massiiviset puuristikot, joissa on tapahtunut vahvistamistarpeeseen johtaneita muodonmuutoksia. Aleksanterin teatterin kaltaisia historiallisesti ja kulttuurisesti arvokkaita rakennuksia on säilynyt Suomessa melko paljon, ja niiden säilyttäminen tulevaisuudessa on maamme kulttuuriperinnön kannalta erittäin tärkeää.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tutkimuksen päätavoitteena on tutkia vanhojen puisten kattoristikoiden vahvistustapoja. Tavoitteen saavuttamiseksi perehdytään vanhojen puurakenteisten kattokannattajien ja niiden liitosten ominaispiirteisiin. Lisäksi tutkitaan perinteisten puuliitosten mitoittamista ja liitoksiin kohdistuvien voimien siirtymistapoja. Työssä etsitään myös keinoja vanhan puurakenteen kantavuuden arvioimiseksi. Kattorakenteiden vaurioitumismekanismien ymmärtämiseksi perehdytään vanhan puurakenteen kantavuutta heikentäviin vi-

koihin ja vaurioihin. Työn sivutavoitteena on suunnitella Aleksanterin teatterin kattoristikoihin soveltuva vahvistustapa. Sivutavoitteen saavuttamiseksi hyödynnetään lähdekirjallisuudesta löytyvää tietoa ristikoiden vaurioitumistavoista sekä vanhojen puurakenteiden vahvistusmenetelmistä.

Työ rajataan arvokohteiden puurakenteisiin kattoristikoihin. Työssä käsitellyille vahvistustavoille ei yleisesti suoriteta laskennallisia tarkasteluja. Aleksanterin teatterin katsomon yläpuolisille kattoristikoihin suunnitellaan soveltuva vahvistustapa. Tässä työssä ei perehdytä teatterin näyttämön yläpuolisten kattoristikoiden vahvistamiseen, sillä ne eroavat rakenteeltaan ja kuormiltaan katsomon ristikoista, eikä niissä havaittu yleisesti vastaavia vaurioita kuin katsomon kattoristikoissa.

### 1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuusanalyysiä, haastatteluja ja laskennallisia tarkasteluja. Kirjallisuusanalyysiä varten kerätään tausta-aineistoa alan kirjallisuudesta. Kirjallisuusanalyysillä tutkitaan puurakenteiden vahvistusmenetelmiä ja niiden soveltuvuutta puisten kattoristikoiden vahvistamiseen.

Kirjallisuustutkimuksen ja kokeneempien rakennesuunnittelijoiden haastattelujen perusteella valitaan Aleksanterin teatterin kattoristikoihin vahvistustapa ja suoritetaan laskennallisia tarkasteluja vahvistustavan soveltuvuuden varmistamiseksi. Vahvistustavan valintaa varten käydään läpi kohteelle aiemmin tehdyt tutkimukset ja selvitykset sekä hankitaan laskennallisille tarkasteluille lähtötietoja erillisten kohdekäyntien avulla.

### 1.4 Työn rakenne

Työ koostuu johdannon lisäksi kahdeksasta luvusta. Työn luvussa kaksi käsitellään perinteisiä puurakenteisia kattoristikoihin Suomessa sekä puurakentamisen perinteisiä liitostapoja. Kolmas luku painottuu kattoristikoiden yleisimpien vaurioitumistapojen kuvailuun. Luvussa neljä käydään läpi keinoja puurakenteiden lujuuden ja kantavuuden arvioimiseksi ja tutkimiseksi suojelukohteiden näkökulmasta. Viidennessä luvussa käsitellään menetelmiä vaurioituneiden kattoristikoiden vahvistamiseksi. Työn kuudennessa luvussa tuodaan esille arvokohteiden korjaamista koskevia suojelunäkökulmia.

Työn lopussa puurakenteisten ristikoiden vahvistamista havainnollistetaan case-esimerkkien avulla. Työn luvussa seitsemän esitellään kaksi toteutunutta kohde-esimerkkiä, jotka liittyvät arvorakennusten kattorakenteiden korjauksiin. Kahdeksannessa luvussa esitellään Aleksanterin teatterin kattorakenteita ja suunnitellaan niille soveltuva vahvistustapa. Työn päättää yhdeksäs luku, jossa tiivistetään tutkimuksen tulokset ja päätelmät.

## 2. PUISET KATTORISTIKOT

### 2.1 Puu rakennusmateriaalina

Puu on anisotrooppista materiaalia eli sen ominaisuudet ovat erilaiset syiden suunnassa ja syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Puun syiden suunnassa puun veto- ja puristuslujuus ovat moninkertaisia kohtisuoraan suuntaan nähden. Puun kosteusmuodonmuutokset ovat syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa 10–20 kertaa suurempia kuin syiden suunnassa. Ominaisuuksien vaihtelu johtuu puun solurakenteesta, tarkemmin sanottuna solujen pitkänomaisuudesta ja soluseinämiä suuntautuneisuudesta. Lisäksi solujen kokovaihtelu puun kasvukauden aikana aiheuttaa epäjatkuvuutta puun rakenteeseen. [51, s. 44]

Puun rungon poikkileikkaus koostuu vuosirenkaista, jotka muodostuvat kevät- ja kesäpuukerrosten vaihteluista. Puu muodostaa kasvukautensa aikana aina yhden uuden vuosirenkaan. Kevätpuussa solut ovat suurempia kuin kesäpuussa ja kevätpuuta on yleensä puun poikkileikkauksessa suhteellisesti enemmän. Kevät- ja kesäpuun tiheydet ovat soluvaihteluiden takia erilaisia, joten puun lujuusominaisuudet riippuvat kevät- ja kesäpuukerrosten suhteellisista osuuksista. [49, s. 23] Esimerkiksi männyllä kesäpuun veto- ja puristuslujuus on noin kuusi kertaa kevätpuun vetolujuutta suurempi [49, s. 47]. Myös puun kasvumaaperän ravinnepitoisuus ja maantieteellinen sijainti vaikuttavat puun kasvunopeuteen ja siten tiheyteen ja lujuusominaisuuksiin. Esimerkiksi pohjoissuomalaisista metsistä kaadetuissa puissa on niiden hidaskasvuisuuden vuoksi kapeammat vuosirenkaat ja siten puun tiheys on yleisesti suurempi kuin eteläsuomalaisissa puissa. [49, s. 26]

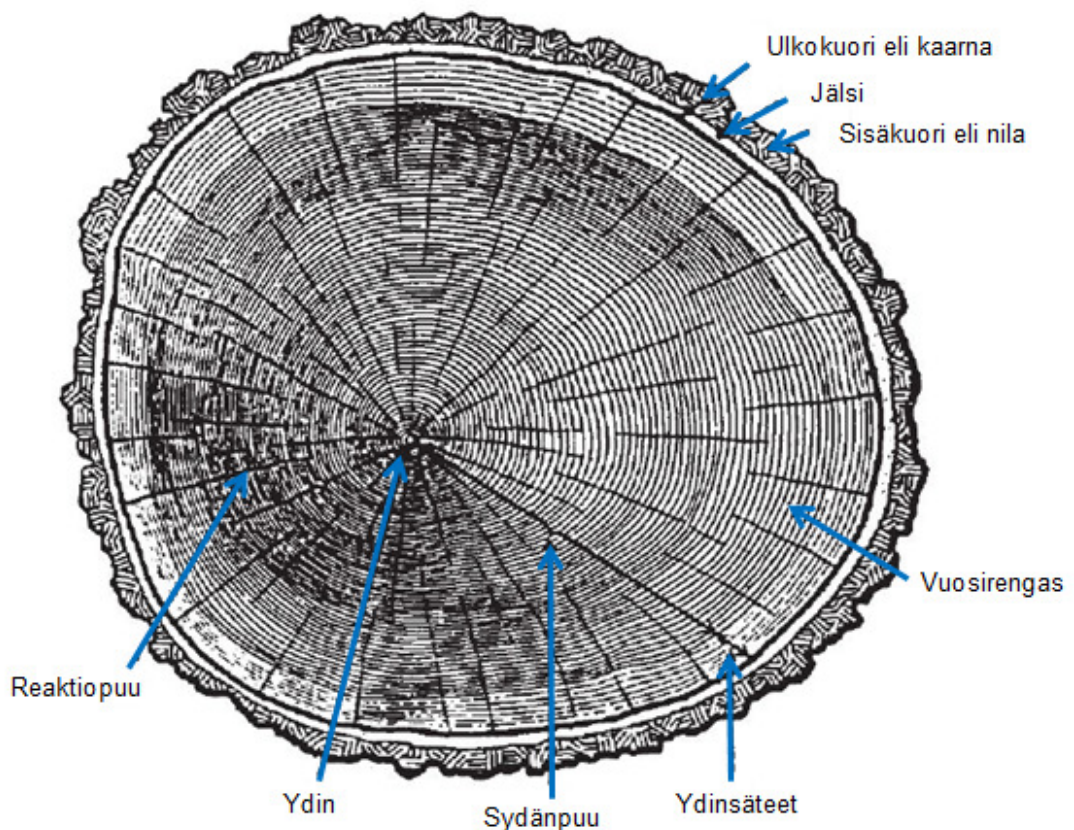
Puun rungon sisintä osaa kutsutaan sydänpuuksi. Kasvavassa puussa sydänpuu on kuollutta solukkoa, joka ei kuljeta enää ravinteita. Sydänpuu toimii kasvavalle puulle ikään kuin tukirunkona. Sydänpuu on usein väriltään tummempaa kuin pintapuu. [49, s. 24] Sydänpuussa on kemikaaleja, jotka suojaavat puuta mikrobiologisilta vaurioilta ja tuhohyönteisiltä. Vuosisatoja vanhoissa puurakennuksissa puusepät ovat taidokkaasti hyödyntäneet sydänpuuta säärasitukselle alttiina olevissa rakennusosissa, minkä ansiosta rakennukset ovat saavuttaneet pitkän käyttöiän. [24, s. 79]

Puun rakenteellista lujuutta heikentävät erilaiset kasvuviat. Puun kasvuvikoja ovat muun muassa oksat ja reaktiopuu, joita käsitellään tarkemmin seuraavissa kappaleissa. [49, s. 27] Puussa esiintyvät kasvuviat aiheuttavat suuria paikallisia jännityksiä ja kuormien epäkeskisyyttä rakenteeseen. [51, s. 201] Puun rakenteellisiin ominaisuuksiin vaikuttavat erityisesti kevätpuussa esiintyvät vikat, sillä kevätpuun osuus on yleensä kesäpuun osuutta suurempi [49, s. 26].

Oksat luovat puurakenteeseen epähomogeenisuutta ja ne heikentävät puun lujuutta. Syiden suuntaan vetorasitetussa rakenteessa oksien ympärillä tapahtuvat syiden suunnanmuutokset aiheuttavat rakenteeseen syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä. [51, s. 201] Oksat suuntautuvat kohtisuoraan puun syysuuntaa vastaan, joten ne heikentävät syysuuntaisia lujuusominaisuuksia. Oksaisuutta voidaan puun kasvuvaiheessa vähentää pystykarsinnalla. [49, s. 27]

Yhtenä kasvuvikana voidaan mainita puurunkoon syntyvä reaktiopuu, jota muodostuu puuhun kohdistuvien jatkuvasti samansuuntaisten taivutusrasitusten seurauksena. Tällaisia rasituksia aiheuttavat esimerkiksi tuuli tai puun vino kasvualusta. Havupuissa reaktiopuuta syntyy kaarevan rungon puristusrasitetulle alueelle, kun taas lehtipuissa reaktiopuu syntyy rungon vetorasitetulle alueelle. Havupuiden reaktiopuuta kutsutaan lylyksi ja lehtipuiden reaktiopuuta vetopuuksi. Reaktiopuun tiheys on normaalipuun tiheyttä suurempi ja se aiheuttaa puun kieroutumista. Havupuissa reaktiopuun murtotapa on kuivuttuaan hauras. Lehtipuiden vetopuusta ei ole samankaltaista haittaa puurakenteelle kuin havupuiden lylystä. [49, s. 29]

Kasvavan havupuun rungossa on uloimpana kerroksena puuta kuivumiselta suojaava kuorikerros, joka koostuu kovasta ja kuivasta ulkokuoresta eli kaarnasta sekä ravinteita kuljettavasta sisäkuoresta, nilasta. Sisäkuoren alla on jälsikerros, jossa muodostuu uusia puusoluja. [49, s. 23] Kuvassa 2.1 on esitetty havupuun rungon poikkileikkaus.



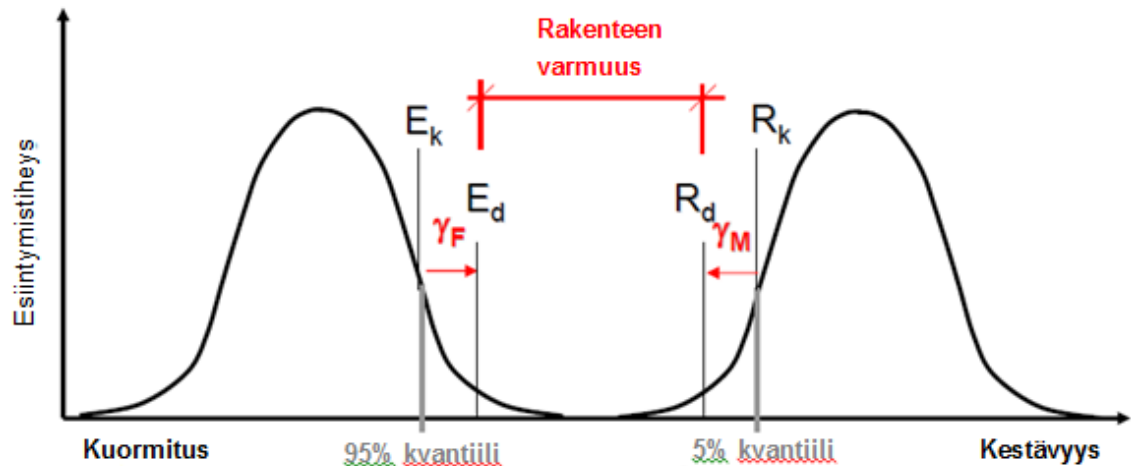
**Kuva 2.1** Havupuun rungon poikkileikkaus [24, s. 80. Muokattu]

Rakennesahatavara luokitellaan havu- ja lehtipuihin niiden erilaisen solurakenteen perusteella. Lehtipuun kevät- ja kesäpuun välillä ei ole yhtä suuria eroja soluseinämän paksuudessa ja soluontelon koossa kuin havupuulla. [51, s. 46–47] Erilaisten rakenteidensa vuoksi lehtipuiden ja havupuiden lujuusominaisuudet on luokiteltu standardissa EN338 erikseen, missä havupuille on annettu lujuusluokat C14-C50 ja lehtipuille D18-D70 [48]. Suomessa rakennusteollisuudessa käytetyimmät puulajit ovat mänty ja kuusi, sillä niitä kasvaa Suomen metsissä yli 80 % kaikista puulajeista [49, s. 33].

Rakennesahatavara lajitellaan lujuusluokkiin joko visuaalisella tai koneellisella lajitte-  
lulla. Lajitteluohjeissa on määritelty kunkin lujuusluokan ominaisuuksien vähimmäisar-  
vot, joten normaalisti tiettyyn lujuusluokkaan lajiteltu sahatavara on lujuusominaisuuksiltaan kyseisen lujuusluokan alarajan arvoja parempi. [49, s. 58] Eurooppalaisten lujuuslajittelusääntöjen mukaan sahatavaran lujuuslajittelun tulee perustua sen epäedullisimpaan poikkileikkaukseen, jolloin yksittäisen sahatavarakappaleen ominaisuudet ovat koko kappaleen pituudelta vähintään ilmoitetun lujuusluokan suuruiset [51, s. 73]. Sahatavaran visuaalinen lajittelu perustuu pääasiassa puun oksaisuuden, halkeamien, kierouden, tilavuuspainon, kesäpuun osuuden, reaktionpuun määrän sekä biologisten ja mekaanisten vaurioiden määrän arviointiin. [49, s. 62] Koneellisessa lujuuslajittelussa sahatavaraa taivutetaan paikallisesti sen heikomman akselin suhteen ja taivutuskokeen perusteella saadaan laskettua paikallinen kimmomoduuli, jonka määrittämisessä otetaan huomioon sahatavaran lapevääryys ja poikkileikkausmitat [51, s. 75].

Eri lujuusluokkien karakteristinen taivutuslujuus on määritelty siten, että enintään 5 prosenttia tiettyyn lujuusluokkaan lajitellusta puutavarasta voi alittaa kyseisen lujuusluokan mukaisen taivutuslujuuden arvon, mutta vastaavasti vähintään 95 prosentilla taivutuslujuus on vähintään yhtä suuri kuin ilmoitettu lujuusarvo. Vaikka 5 prosentilla tietyn lujuusluokan sahatavarasta taivutuslujuus saattaa olla ilmoitettua lujuutta pienempi, niin laskennassa materiaalilujuuksien ja kuormien mitoitusarvoihin sisällytetään osavarmuusluvut, joiden avulla varmistetaan, että rakenne ei murru käyttökuormien alaisena. [37, s. 270] Kuvassa 2.2 on havainnollistettu mitoituskuormien ja –lujuuksien välistä varmuutta.





**Kuva 2.2** Materiaalilujuuksien ja kuormien mitoitusarvojen määrittely [58. Muokattu]

Sahatavaran lujuusluokittelussa puutavara testataan vakiokosteudessa, joka vastaa +20 °C:n lämpötilaa ja 65 % suhteellista kosteutta eli puurakenteessa noin 12 %:n kosteuspitoisuutta [51, s. 61]. Taulukossa 2.1 on lueteltu yleisimmän sahatavaraluokan C24 mukaisia ominaislujuusarvoja ja kimmokertoimia.

**Taulukko 2.1** Sahatavaran C24 ominaislujuusarvoja ja kimmokertoimia [48]

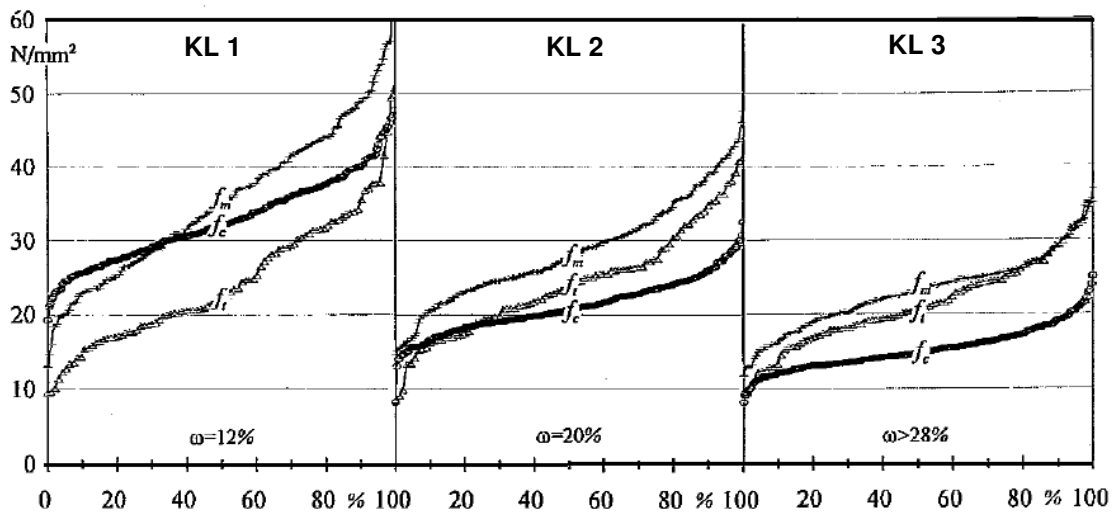
	Syiden suuntaan [N/mm <sup>2</sup> ]	Sytä vastaan koh- tisuoraan suuntaan [N/mm <sup>2</sup> ]
Taivutuslujuus	24	-
Vetolujuus	14	0,4
Puristuslujuus	21	2,5
Leikkauslujuus	4,0	-
Kimmokerroin	11000	370

Puun mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat eri kosteusolosuhteissa. Kosteuspitoisuuden kasvun myötä puurakenteen lujuusarvot ja kimmokerroin pienenevät. Vesi heikentää puun soluseinämien vetysidoksia, jotka pitävät soluseinämät koossa. Kosteuden vaihteluilla on suuri merkitys esimerkiksi puun puristuslujuuteen, sillä puurakenteen syysuuntaisessa puristuksessa rakenteen murtuminen johtuu juuri solujen nurjahtamisesta. [51, s. 59] Puurakenteiden suunnitteluohjeessa (Eurokoodi 5) rakenteiden kosteuskäyttäytyminen on otettu huomioon jakamalla rakenteet eri käyttöluokkiin niitä ympäröivien lämpö- ja kosteusolosuhteiden perusteella. [7, s. 23] Taulukossa 2.2 on määritelty Eurokoodin 5:n mukaiset käyttöluokat puurakenteille.

**Taulukko 2.2** Puurakenteiden käyttöluokat ja niiden määritelmät [7, s. 23]

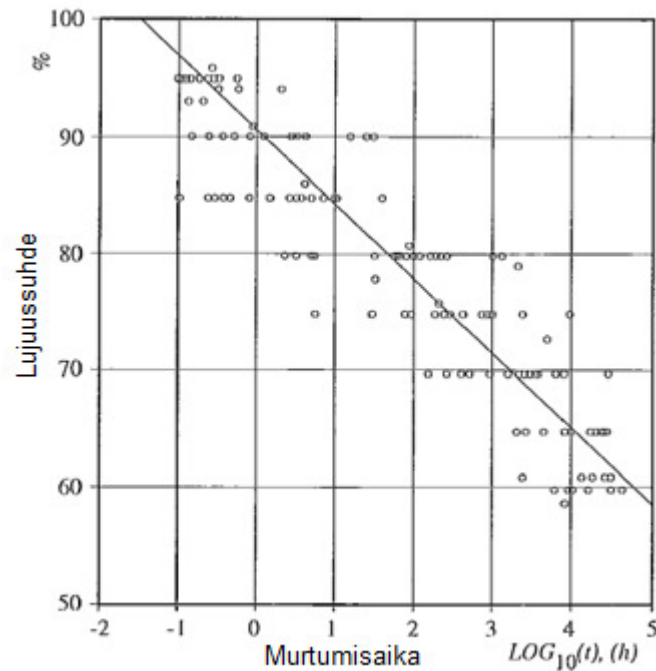
Käyttöluokka	Olosuhteet
1	Materiaalin kosteus 20 °C:n lämpötilaa vastaava, ympäröivän ilman suhteellinen kosteus ylittää arvon 65 % vain muutamana viikkona vuodessa. Esimerkiksi lämmitetty sisätila.
2	Materiaalin kosteus 20 °C:n lämpötilaa vastaava, ympäröivän ilman suhteellinen kosteus ylittää arvon 85 % vain muutamana viikkona vuodessa. Esimerkiksi ulkoilmassa kuivana oleva puurakenne.
3	Ilmasto-olosuhteet johtavat suurempiin arvoihin kuin käyttöluokassa 2. Esimerkiksi ulkona säälle alttiina oleva puurakenne.

Kuvassa 2.3 on esitetty kuusesta valmistettujen koekappaleiden taivutus- ( $f_m$ ), puristus- ( $f_c$ ) ja vetolujuuksien ( $f_t$ ) ominaisarvoja fraktiileittain eri kosteuspitoisuuksien suhteen. Puurakenteiden suunnitteluohjeen käyttöluokan 1 mukaisen rakenteen murtotapa taivutuksessa on hauras, sillä sen puristuslujuus on suurempi kuin vetolujuus. Käyttöluokan 3 mukaisella rakenteella puristuslujuus on taas vetolujuutta pienempi ja sen murtotapa on sitkeä. Käyttöluokan 2 mukaisilla puurakenteilla rakenteen murtotapa taivutuksessa riippuu puun laadusta. [51, s. 61]

**Kuva 2.3** Puurakenteen kosteuspitoisuuden vaikutus kuusikoekappaleiden ominaislujuuksiin eri käyttöluokissa [51, s. 60]

Kuormitetun puurakenteen lujuusominaisuudet heikentyvät ajan myötä. Tehtyjen tutkimusten perusteella pitkäaikaisen kuormituksen alaisessa puurakenteessa lujuus on enää alle 60 prosenttia lyhytaikaisen kuormituksen alaiseen puurakenteeseen verrattuna. [51, s. 61] Kuvassa 2.4 on esitetty pitkäaikaisen ja arvioidun lyhytaikaisen kuorman suhteen

muuttumista murtumisajan logaritmin funktiona. Kuvaajan perusteella nähdään, että pitkäaikaisessa kuormituksessa lujuus laskee alle 60 %:iin lyhytaikaisesta lujuudesta.



**Kuva 2.4** Virheettömän taivutuskoekappaleen lujuussuhde murtumisajan logaritmin funktiona [51, s. 61]

Lujuuden lasku pitkäaikaisen kuormituksen alaisessa rakenteessa otetaan suunnittelussa huomioon aikavaikutuskertoimella  $k_{mod}$ . Kertoimen arvo riippuu kosteusolosuhteista ja kuormitusajasta sekä mitoitettavan puutavaran tyypistä. Esimerkiksi rakennesahatavaraalla aikavaikutuskerroin on suurempi kuin lastu- ja kuitulevyillä, eli kosteuden ja kuormitusajan vaikutus sahatavaran lujuuteen on pienempi. Aikavaikutuskerroin otetaan rakenteiden mitoituksessa huomioon lujuusominaisuuksia pienentävänä tekijänä. Puurakenteiden lujuuksien mitoitusarvot saadaan kaavalla 2.1 [7, s. 25]

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (2.1)$$

missä

$X_d$  on lujuusominaisuuden mitoitusarvo

$k_{mod}$  on muunnoskerroin, joka huomioi kuorman keston ja kosteuden vaikutuksen

$X_k$  on lujuusominaisuuden ominaisarvo

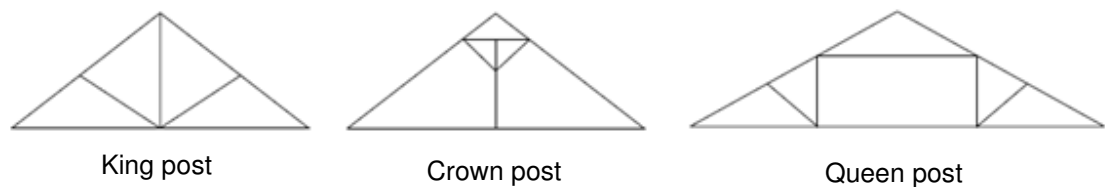
$\gamma_M$  on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku

## 2.2 Kattoristikkorakenteiden historia

### 2.2.1 Varhainen historia

Euroopassa käytetyt varhaiset kattoristikkorakenteet juontavat juurensa alun perin roomalaisten kirkkojen ristikkorakenteista, jotka kehittyivät aikoinaan kreikkalaisten käyttämästä palkkien ja pystytolppien muodostamasta kattorakenteesta. Varhaisissa puuristikoissa ei useinkaan ymmärretty rakenteellisista voimista, vaan ristikoiden rakenne muotoutui kokemuksen kautta. Pohjoiseurooppalaisessa käytössä roomaaniset kattotuolit muotoutuivat vähän jyrkemmiksi ja jäykemmiksi, jolloin ne olivat rakenteellisesti tehokkaampia. [52, s. 129]

Kattoristikoiden varhaista historiaa edustavat king post- ja queen post-tyyliset ristikot. Nämä ristikkomallit syntyivät, kun rakennusten kokojen kasvaessa vesikaton harjapalkkiin tukeutuvia kattokannattajia piti pidempien jänneväliden takia tukea lisää. [52, s. 129] Tällöin kattokannattajien alapää kiinnitettiin toisiinsa vaakasuuntaisella tuella, jonka avulla saatiin estettyä rakennuksen ulkoseiniä ulostyöntyminen kattokannattajilta tulevan puristusvoiman vaakakomponentin johdosta. [12, s. 164] Kuvassa 2.5 on esitetty edellä mainittujen ristikoiden rakenteelliset mallit.



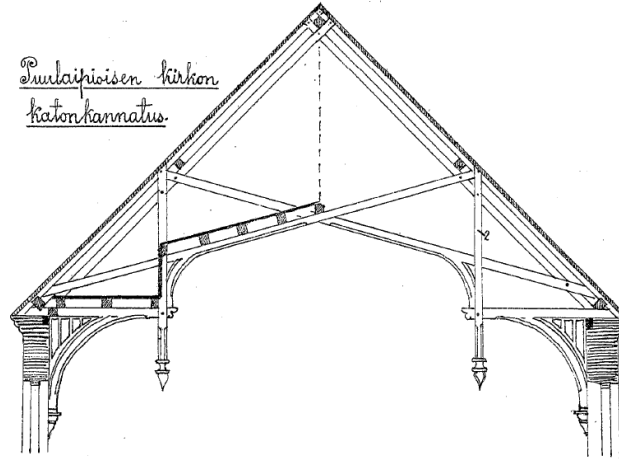
**Kuva 2.5** Varhaisia ristikkomalleja

King post-ristikossa on keskellä yksi pystytuki, kun taas queen post-ristikossa niitä on kaksi etäällä toisistaan. Lisäksi pystytukiin on saatettu liittää vinotukia yläpaarteiden tukemiseksi. Näissä ristikkotyypeissä pystysauvat ovat vedettyjä rakenteita. Crown post-ristikko vastaa tyyliltään king post-ristikkoa, mutta tässä ristikkotyypissä pystytuki ei ulotu ristikon harjalle asti, vaan tukeutuu poikittaissuuntaiseen sidepalkkiin. Crown post-ristikossa pystytuki on puristettu rakenne. [52, s. 129]

### 2.2.2 Kirkot ja tornit

Suomessa käytettiin keskiaikaisissa kirkoissa niin kutsuttuja konttikattotuoleja, joiden idea omaksuttiin Ruotsista. Tämän vuoksi kyseisiä kattotuoleja kutsutaan myös ruotsalaisiksi kattotuoleiksi. Keskiajalla kirkkojen holvatut katot ulottuivat muurinharjojen yli, minkä vuoksi kattoristikoissa ei voitu käyttää alapaarretta. Tämän johdosta katon kuormat vietiin eteenpäin kantaville rakenteille konttipuiden avulla, jotka liittyivät muurin tasakerran päälle tuettuun jalasorteen. [16, s. 32]

Perinteisesti kirkkojen kattokannatukseen on käytetty niin sanottua Hammer beam-rakennetta, jossa ristikon sauvat tukeutuvat ristikon alakulmiin sijoitettuihin lyhyisiin vaakapalkkeihin, joista rakenne saa myös nimensä. [52, s. 130] Kuvassa 2.6 on esitetty kirkon kattorakenne, jossa on puulaipio eli puuverhoiltu sisäkatto.



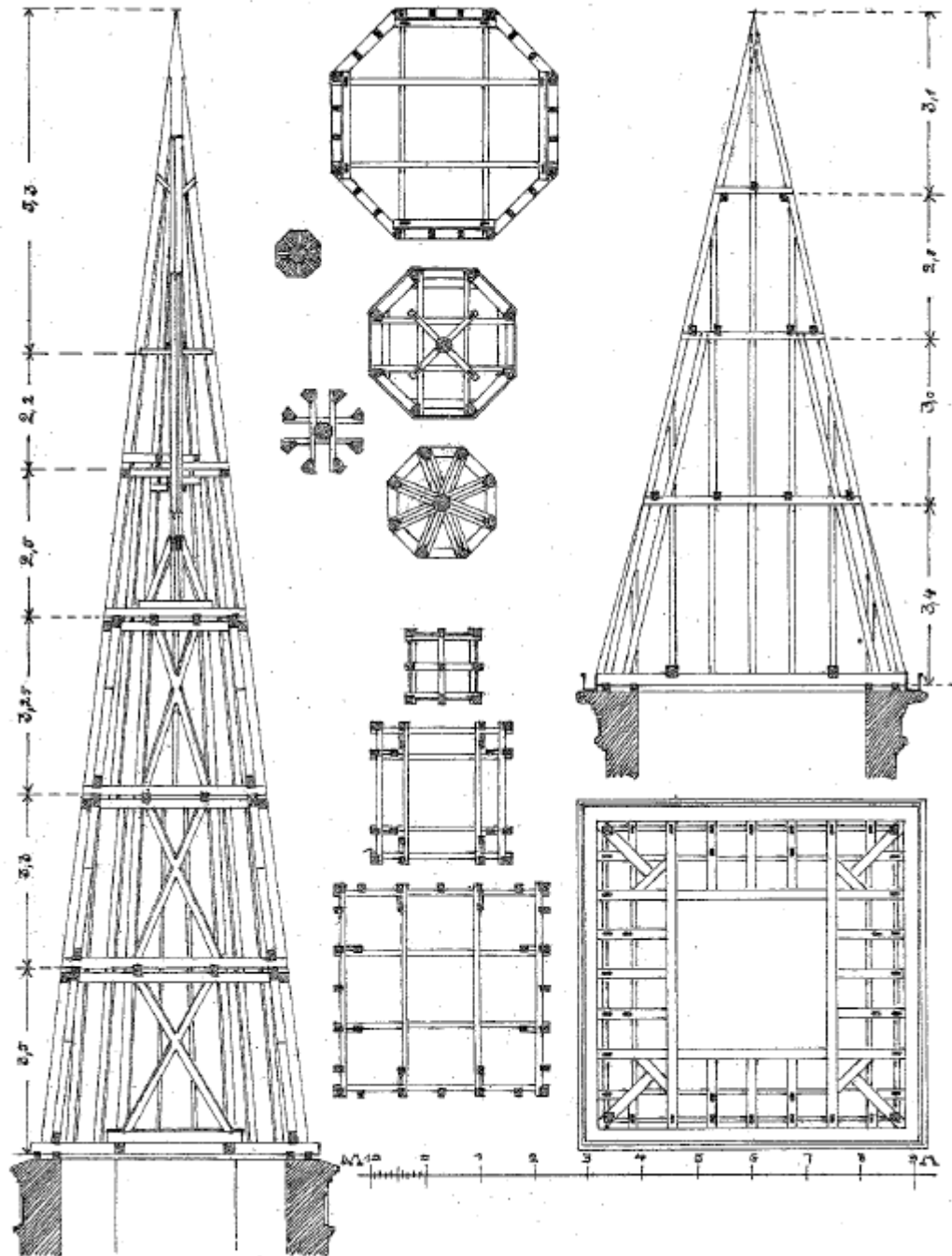
**Kuva 2.6** Kirkon kattorakenne [3, liites. 26. Muokattu]

Kirkkoihin on tavallisesti haluttu rakentaa korkea avoin tila rakennuksen sisälle. Kirkkoissa sisäkatot eli laipiot on yleensä rakennettu kattokannattajia mukaillen, jolloin yhtenäisestä sisätilasta on saatu mahdollisimman korkea. Kuvassa 2.7 on kirkon sisäkattorakenteita, joissa sisäkaton verhous on kiinnitetty kattotuolien yläpintaan. Joissakin kirkkoissa kirkkosalin katto on tehty holvaamalla. Tällöin kantavat kattorakenteet ovat sisäkatoista erillään olevia rakenteita. [3, s. 48]



**Kuva 2.7** Köyliön kirkon kattokannattajat

Torneissa on perinteisesti käytetty telttakattoja, joissa kaikki katon lappeet yhtyvät yhteen kärkipisteeseen. Tornien kattorakenteiden erityispiirteenä on niiden pieni pohjapinta-ala suhteessa kattorakenteen korkeuteen. [3, s. 48–56] Kuvassa 2.8 on tyypillisiä tornin kattorakenteita.



**Kuva 2.8** Tyypillisiä tornin kattorakenteita [3, liites. 32]

Torneissa katon tuulikuorma on yleensä huomattavasti suurempi kuin muiden rakennusten katoilla. Siksi vanhoissa torneissa kattoja on pyritty jäykistämään koko rungon läpi kulkevalla sydänhirrellä, johon jokainen tornin välipohja on tuettu. Tällainen rakenne

osoittautui kuitenkin hankalaksi tornissa kulkemisen kannalta, eikä sitä todettu rakenteellisestikaan parhaaksi mahdolliseksi. Rakennetta muutettiin siten, että sydänhirsi kulki vain tornin katon ylimmän osan läpi kuvassa 2.8 olevan vasemmanpuoleisen tornirakenteen mukaisesti ja katon alaosa jäykistettiin ristituilla, jolloin tornin huipun keskiosa jäi vapaaksi. [3, s. 48–56]

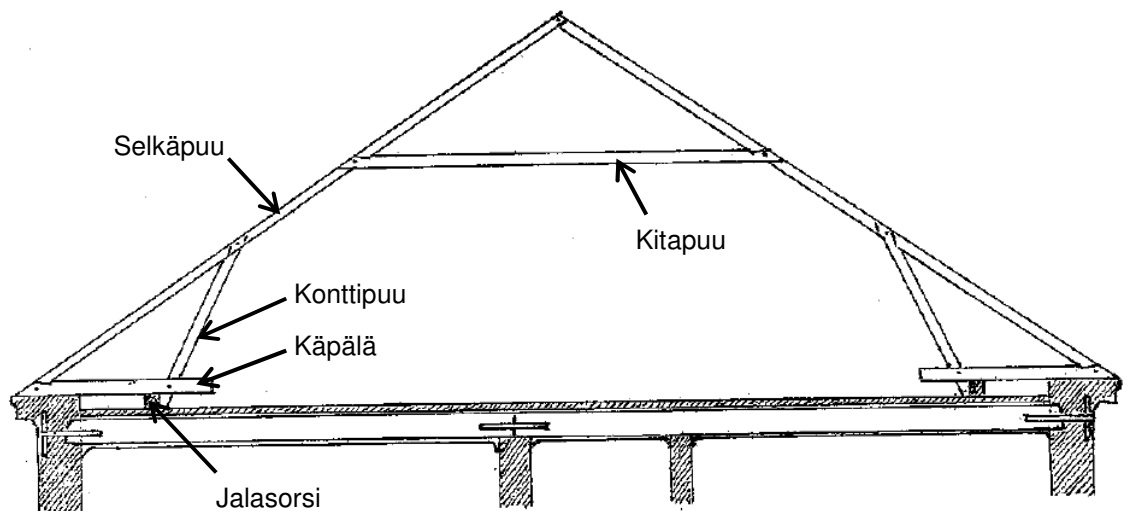
### 2.2.3 Yleiset rakennukset

1800-luvulla konttikattotuolien käyttö yleistyi Suomessa kirkkojen lisäksi muussakin rakentamisessa, ja niitä käytettiin yleisesti aina 1930-luvulle asti [16, s. 32]. Niiden avulla rakennuksiin voitiin rakentaa ullakkokerros. Konttikattotuoleja käytettäessä rakennuksen ulkoseinät ulotettiin tavallisesti jonkin verran ullakon lattian yläpuolelle kuvan 2.9 mukaisesti. Tällöin rakennuksen ullakolle saatiin aikaiseksi korkea ja vapaa yhtenäinen tila. Konttikattotuolit olivat yleisiä myös siksi, että niissä voitiin käyttää aikakaudelleen suhteellisen hoikkia puurakenteita. Niitä käytettiin yleisesti myös jyrkkien kattojen rakentamisessa, vaikka erillistä ullakkotilaa ei haluttukaan rakentaa. [3, s. 39–40]



*Kuva 2.9 Konttikattotuolien avulla aikaansaatu korkea ullakkotila [18]*

Konttikattotuolit koostuvat selkäpuista, kitapuusta, konttipuista, kápälistä ja jalasorsista. Selkäpuu eli yläpaarre muodostaa katon lappeen. Selkäpuiden yläosat on sidottu toisiinsa kitapuulla, jonka tehtävänä on jäykistää kattotuolirakennetta. Selkäpuuhun kiinnittelyllä konttipuulla siirretään selkäpuun puristusrasituksia eteenpäin tukirakenteille. Samalla ne tukevat selkäpuuta pienentäen sen jänneväliä. Kápälä toimii yhtenä kattotuolin jäykistävä rakenteena sitomalla konttipuun ja selkäpuun toisiinsa. Konttipuun sijainti vanhoissa rakennuksissa vaihtelee ja se voi olla tuettu joko läheltä seinää tai vähän kauempana seinästä. Jalasorren sijainti riippuu tavallisesti ulkoseinän tasakerran ja ullakon lattian välisestä korkeuserosta. Mikäli seinän tasakerta ja ullakon lattia on rakennettu lähes samaan tasoon, on jalasorsi yleensä sijoitettu melko etäälle ulkoseinästä. [20, s. 162–163] Jalasorret siirtävät konttipuilta tulevat pystykuormat kitkan avulla kantaville yläpohjarakenteille. Joissakin konttikattotuoleissa jalasorsia on kaksi, joista toinen on ulkoseinän tiilimuurauksen ulkopinnassa ja toinen sisäpinnassa. Jalasorret on voitu yhdistää toisiinsa sidepuilla, minkä jälkeen sidepuiden ja jalasorsien väliin jäävä tyhjä tila on muurattu umpeen rakenteen jäykistämiseksi. [16, s. 32] Konttikattotuolin rakenne on esitetty kuvassa 2.10.

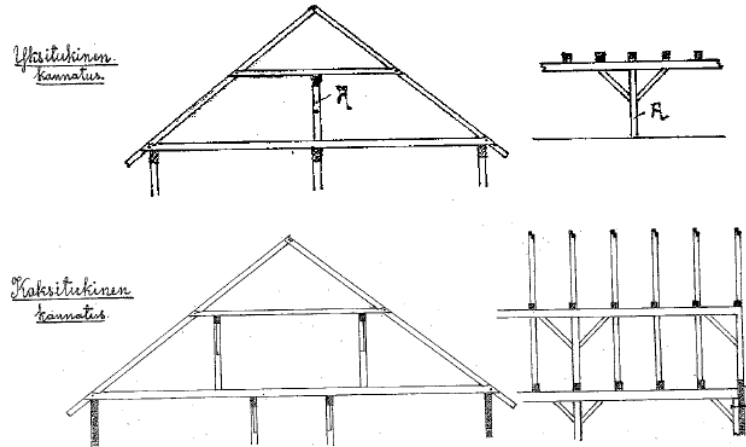


**Kuva 2.10** Konttikattotuoli [3, liites. 20. Muokattu]

Konttipuun liitos jalasorteen on voitu toteuttaa kynsiliitoksen avulla. Kápälän ja konttipuun liitokset selkäpuuhun on voitu tehdä esimerkiksi lohenpyrstöliitoksella. Kitapuu on kiinnitetty selkäpuuhun esimerkiksi lohilapaliitoksella, jota on vahvistettu puutapilla. [3, s. 39] Erilaisia liitostapoja on esitetty myöhemmin kappaleessa 2.3.

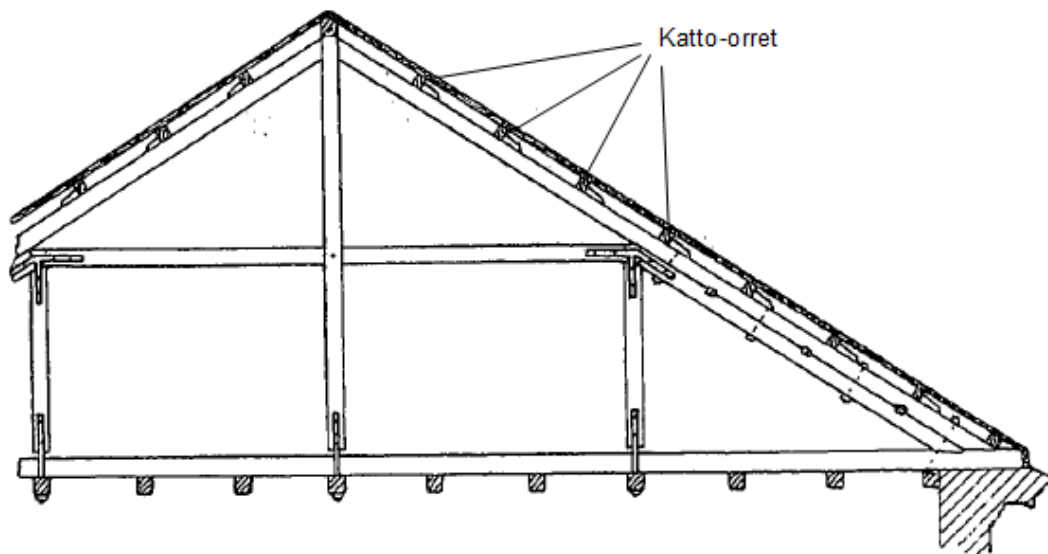
Isoilla jänneväleillä kitapuuta on voitu tukea harjan suuntaisella jalasorrella, joka on kannatettu pystytolpilla. Tällaisia rakenteita on esitetty kuvassa 2.11. Jalasortta on usein tuettu pystytolppiin kiinnitetyillä vinotuilla eli niin sanotuilla vitaposkilla, jotka ovat samalla tukeneet myös pystytolppia. Pystytolppia on voinut olla joko yhdessä linjassa rakennuksen keskellä tai kahdessa erillisessä linjassa, jolloin näiden väliin on jäänyt yhtenäinen vapaa tila. [3, s. 40]





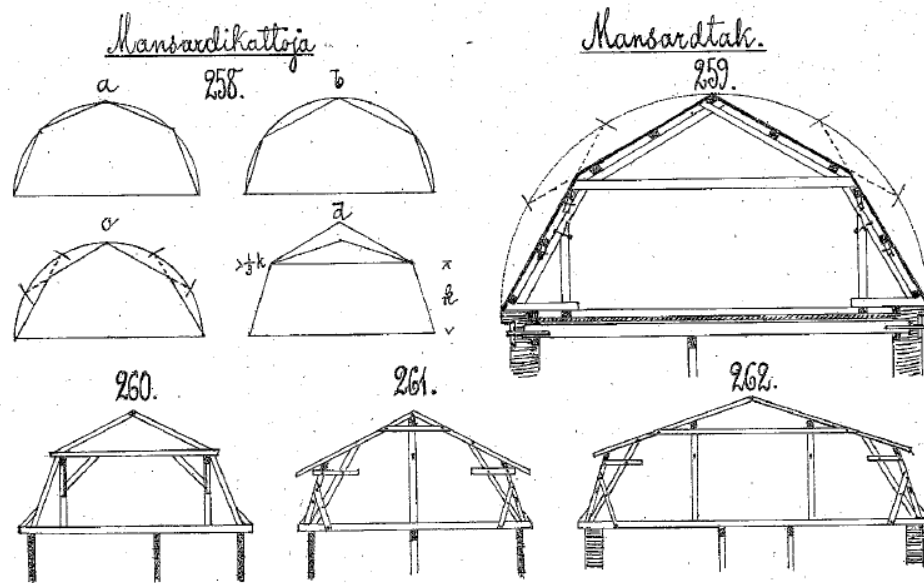
**Kuva 2.11** Kitapuun kannatuksia [3, liites. 20. Muokattu]

Vanhoissa kattorakenteissa on usein kattoristikoiden päälle asennetut harjan suuntaiset katto-orret (kuva 2.12), jotka ovat toimineet kattorakenteen jäykistävänä osana. Harjan suuntaisten katto-orsien avulla on myös saatu kasvatettua kattoristikoiden sallittua kuormitusleveyttä. Vanhoissa kattorakenteissa on ristikoille saatettu käyttää jopa 2,5–3,5 metrin kuormitusleveyyksiä. [22, s. 41]



**Kuva 2.12** Kattorakenne, jossa kattoristikoiden päälle on asennettu katto-orret [22, liites. 22. Muokattu]

Perinteisiä kattomalleja Suomessa ovat olleet satula- eli harjakattojen lisäksi mansardi- ja aumakatot. Mansardikattojen eli taitekattojen lappeet ovat nimensä mukaisesti taitteellisia. Aumakatot eroavat mansardikatoista siten, että myös katon päädyissä on kolmionmalliset päätylappeet, jotka yhtyvät katon harjaan. Aumakatoissa katon harja ei siis ulotu rakennuksen päästä päähän. [3, s. 48–51] Kuvassa 2.13 on erilaisia mansardikattomalleja.



**Kuva 2.13** Mansardikattomalleja [3, liitesivu 27]

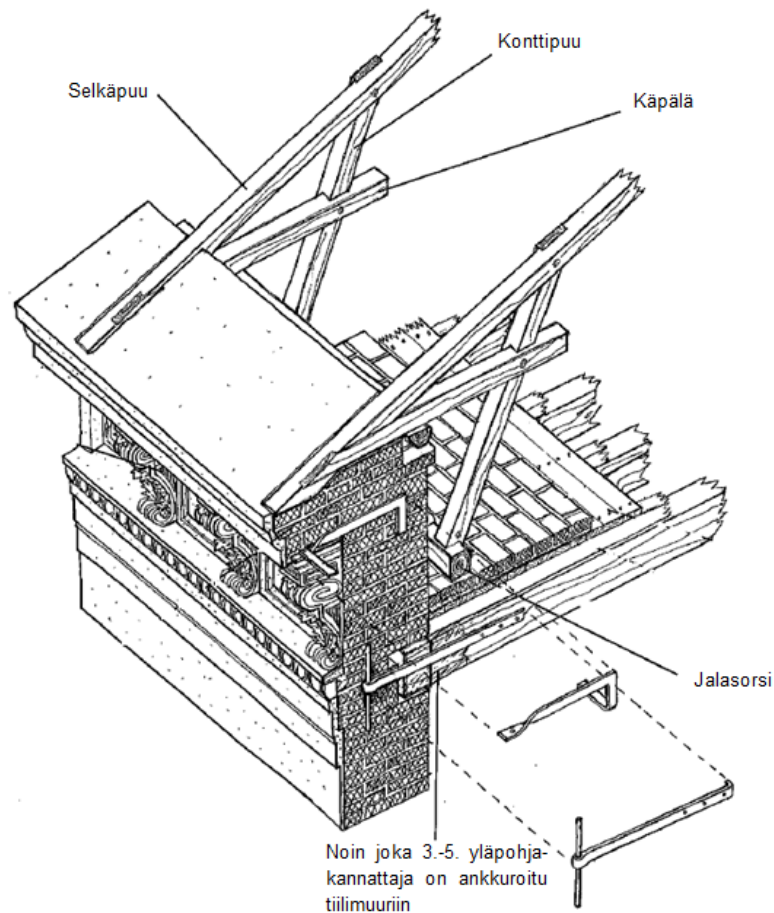
Erilaisia kattomalleissa on tavallisesti hyödynnetty perinteistä konttikattotuolirakennetta, jota on ollut helppo muokata katon muotoilun ja kaltevuuden mukaan [3, s. 40]. Kuvassa 2.14 on mansardikattoinen rakennus, johon on konttikattotuoleilla saatu melko korkea ullakkotila.



**Kuva 2.14** Mansardikatto [18]

Konttikattotuolien kanssa on käytetty usein yläpohjan kantavana rakenteena ulkoseiniin ankkuroituja vuoliaisia eli yläpohjapalkkeja, jotka ovat samalla sitoneet ulkoseinära-

kennetta. Niiden avulla on voitu huolehtia konttipuilta tulevan puristusvoiman vaakakomponentista, joka kohdistuu ulkoseiniin niitä ulospäin työntävästi. [3, s. 40] Kuvassa 2.15 on havainnollistettu perinteisen konttikattotuolin ja yläpohjan rakennetta.

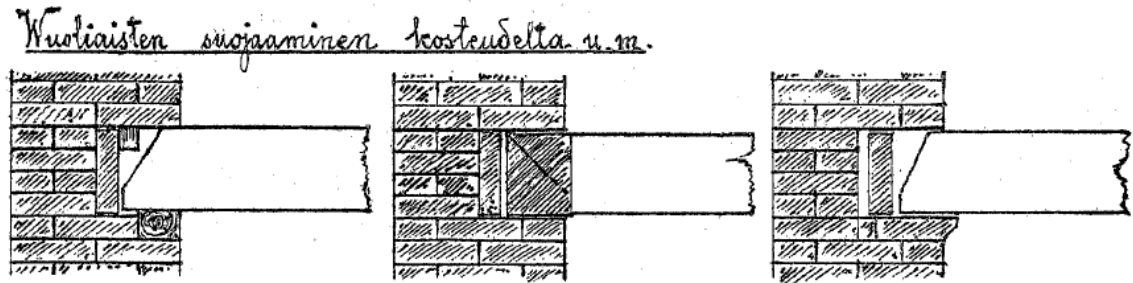


**Kuva 2.15** Kantavien yläpohjarakenteiden liitos ulkoseinään [31, s. 45. Muokattu]

Vanhoissa yläpohjarakenteissa yläpohjapalkit on tuettu kantavan tiilimuurin varaan kuvan 2.15 mukaisesti. Myös vanhojen puisten ristikkorakenteiden alapaarteita on tuettu tiilimuriin. Tiilimuurin kanssa kosketuksissa olevat puurakenteet on pitänyt suojata tiilimuurissa olevalta kosteudelta. Vuodelta 1903 olevassa Huonerakenteiden oppinimisessä teoksessa on ohjeistettu suojaamaan kivirakennuksissa seinän sisään tuettujen puupalkkien päät kosteudelta vuoraamalla ne asvalttihuovalla. Huovan alle on voitu kiinnittää pienet tuuletusrimat, jotta palkin pää on päässyt kuivumaan. Lisäksi palkin pää on pitänyt jättää riittävälle etäisyydelle muurin ulkopinnasta, jotta talvella kosteus ei pääsisi kondensoitumaan palkin päähän. [3, s. 18]

Vuodelta 1925 olevassa Rakennusopin tietokirjassa ohjeistetaan suojaamaan tiiliseinän sisään jäävät puurakenteet kosteudelta sivelemällä ne kreosoottiöljyllä, karbolineumilla tai puutervalla [22, s. 25]. Kreosoottiöljy ja karbolineumi ovat kivihiilitervan tislauks tuotteita [33, s. 17]. Palkkien leikkauspinta on ohjeistettu kuitenkin jätettäväksi ilman sivelyä, jotta puussa oleva ylimääräinen kosteus pääsisi haihtumaan. Näiden lisäksi sei-

nän sisään jäävien palkkien päät on tullut kääriä vielä tervatulla tuohella tai asvalttipahvilla. Palkkien päiden kummallekin puolelle ja erityisesti palkin leikkauspinnan eteen on pitänyt asentaa kuivat tiilet ilman muurauslaastia, jotta ne sitoisivat itseensä seinärakenteessa olevan ylimääräisen kosteuden. [22, s. 25] Kuvassa 2.16 on esitetty tiilimuuriin tuetuille palkeille erilaisia suojaamistapoja.



**Kuva 2.16** Tiiliseinän sisään jäävien puuosien suojaaminen kosteudelta [3, liites. 11. Muokattu]

Kuvassa 2.16 vasemmalla on palkin pää tehty vinoksi ja sen eteen on tehty ilmakehänava, jossa kulkee jatkuva ilmavirta. Ilma-aukkoja on tehty vuoliaiskerroksen kohdalle sekä ullakolle. Palkin alla on käytetty erillistä muuriortta, joka on tehty kuivasta ja tervatusta lankusta. Tämän tarkoitus on ollut estää kosteuden nouseminen muurista palkkiin ja lisäksi jakaa palkin rasituksia isommalle alalle tiilimuurissa. Edellä mainittua suojaustapaa on lähdekirjallisuudessa kehitetty edulliseksi. Kuvassa 2.16 keskellä palkin pää on vuorattu asvalttihiuvalla. Kuvassa 2.16 oikealla palkin päähän on jätetty ilmarako, jotta siinä oleva kosteus pääsee haihtumaan. Tällaista tapaa on voitu käyttää silloin, kun tiilimuuri on ollut paksu. [3, s. 18]

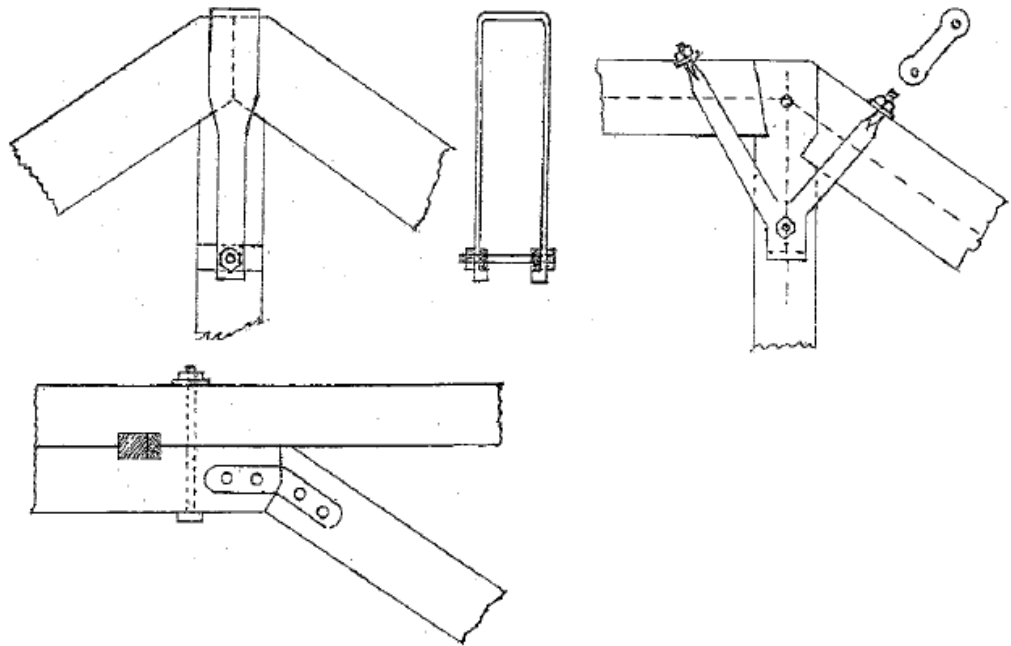
## 2.3 Kattoristikoiden perinteiset liitostavat

### 2.3.1 Perinteisten puuliitosten ominaispiirteet

Perinteiset puuliitokset ovat yleensä käsityönä veistettyjä puuliitoksia, joita kutsutaan myös kirvesmiesliitoksiksi. Yleisesti liitosten tarkoituksena on välittää niihin kohdistuvat voimat liittyviltä rakenneosilta toisilleen. Liitosten toiminnassa on tärkeää liittyvien osien kontaktin säilyminen eli se, etteivät osat pääse irtomaan toisistaan tai liukumaan toistensa suhteen. [49, s. 63]

Perinteiset puuliitokset ovat kosketusliitoksia, joissa puristusvoima välittyy liitettävien puuosien kosketuspintojen kautta ilman erillisiä liittimiä. Liitoksen kapasiteetti perustuu liitoksen kosketuspinta-alaan. [51, s. 409] Kosketusliitoksen voimansiirtokyky perustuu liitettävien osien yhteensopivuuteen ja kosteusmuodonmuutoksiin. Tämän vuoksi liitettävien puuosien kosteuspitoisuuden tulisi olla lähellä valmiin rakenteen tasapainokosteutta. [56, s. 43]

Perinteisten puuliitosten toiminta perustui ensisijaisesti taidokkaaseen puusepäntyöhön, mutta jo 1800-luvulla puuristikoiden liitoksissa käytettiin kiinnikkeinä esimerkiksi rautapultteja ja -tankoja. Kun puuliitos oli huolellisesti veistetty ja vahvistettu lisäksi rautakiinnikkeillä, sillä voitiin tehokkaasti siirtää puristus- ja vetojännityksiä. [12, s. 165] Liitoksiin lisättyjen metallisten liitososien pääasiallinen tarkoitus on ollut säilyttää liitoksen toimintavarmuus epätavallisissa kuormitustilanteissa. Liitososilla on esimerkiksi pyritty varmistamaan kitkaliitoksena toimivan puristusliitoksen koossa pysyminen, jos puristava voima liitoksesta katoaa. [5, s. 416] Perinteisiä rautaisia liitososia ovat olleet erilaiset pultit, ankkuriraudat, rautavyöt, kulmakiskot ja valurautakengät. [22, s. 7] Kuvassa 2.17 on esitetty erilaisia rautavöitä, kulmakisko ja pulttikiinnitys.



**Kuva 2.17** Rautaisia liitososia [3, liitesivut 15–17]

Nykykäsityksen mukaan liitosten mitoituksessa huomioidaan samalla tavalla kosteuden ja kuormitusajan vaikutus liitoksen kestävyYTEEN, kuin yksittäisten rakenneosien mitoituksessakin. Liitosta ympäröivän ilman suhteellinen kosteus ja liitoksen kuormitusaika vaikuttavat liitoksen pitkäaikaislujuuteen ja liitoksen virumaan. Liitosten mitoituksessa voidaan käyttää samoja aikavaikutuskertoimia kuin yksittäisten rakenneosien suunnittelussa, sillä tehtyjen lujuuskokeiden perusteella puuliitosten pitkäaikaislujuus on samankaltainen yksittäisten rakenneosien pitkäaikaislujuuden kanssa. [51, s. 465]

Perinteisissä puuliitoksissa voimat välittyvät liitososilta toisille pääasiassa puristuksen kautta. Liitoksiin kohdistuu tällöin puun syysuuntaan nähden vinoja puristusrasituksia. Puurakenteiden suunnitteluohjeen (Eurokoodi 5) mukaan liitokseen kohdistuvan puristusjännityksen tulee toteuttaa epäyhtälö 2.2 [7, s. 40]

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90}f_{c,90,d}}(\sin \alpha)^2 + (\cos \alpha)^2} \quad (2.2)$$

missä

$\sigma_{c,\alpha,d}$  on puristusjännitys kulmassa  $\alpha$  syysuuntaan nähden

$f_{c,0,d}$  on puristuslujuuden mitoitusarvo syysuuntaisessa puristuksessa

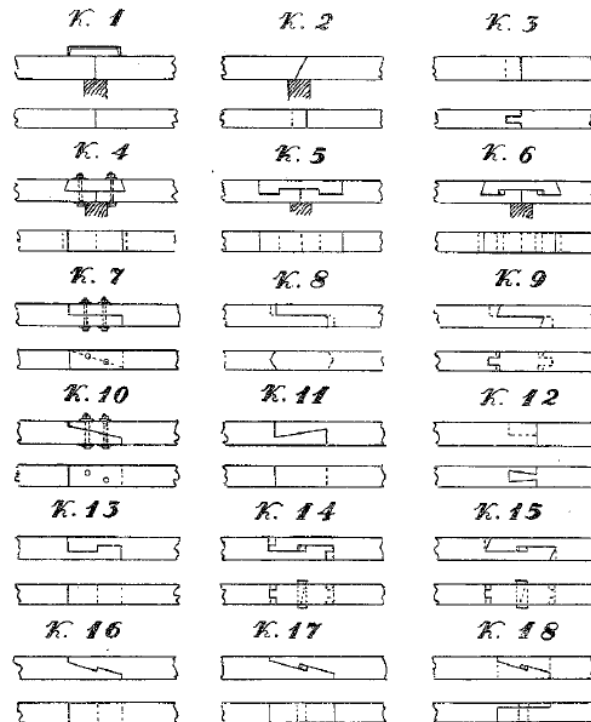
$f_{c,90,d}$  on puristuslujuuden mitoitusarvo syysuuntaa vastaan kohtisuorassa puristuksessa

$\alpha$  on puristusjännityksen ja syysuunnan välinen kulma

$k_{c,90}$  on kerroin, jolla otetaan huomioon mahdollisten syysuuntaa vastaan kohtisuorien jännitysten vaikutus

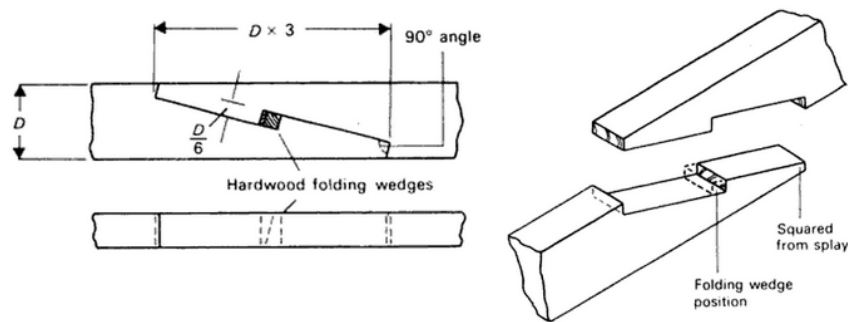
### 2.3.2 Pusku- ja lapaliitos

Perinteiset käsityönä veistetyt liitokset voidaan luokitella niiden geometrian perusteella pusku- ja lapaliitoksiin [49, s. 63]. Kuvassa 2.18 on esitetty erilaisia pusku- ja lapaliitoksia. Perinteinen puskuliitos (kuva 2.18, K1-6) on toteutettu joko suorana tai vinona puskuna. Puskuliitoksella voidaan siirtää puristusvoimia. Kuvan lapaliitoksia (kuva 2.18, K7-K18) on käytetty perinteisissä puurakenteissa esimerkiksi ristikon alapaarten jatkamiseen pitkillä jänneväleillä sekä yleisesti vedettyjen rakenneosien jatkosliitoksiin. Tavallisia lapaliitoksia ovat esimerkiksi suora lapa, vino lapa ja erilaiset hammaslavat. Lapaliitokset soveltuvat joko sellaisenaan tai vahvistettuina vetorasitusten siirtämiseen. [22, s. 8]



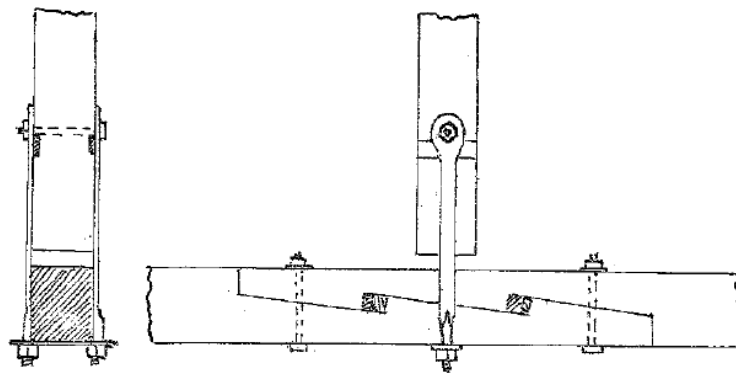
Kuva 2.18 Erilaisia pusku- ja lapaliitoksia [22, liitesivu 1]

Ristikoiden alapaarteiden jatkosliitoksiin on yleisesti käytetty vinoa hammaslapaliitosta, jota on vahvistettu puukiiloilla ja rautapulteilla [3, s. 32]. Kiilapalat on yleensä tehty muuta puurakennetta lujemmasta puusta, kuten tammesta, pyökistä tai koivusta [22, s. 7]. Kiilapalaan kohdistuu vetorasitetussa alapaarteessa suuria puristusjännityksiä. Kiilapalallinen vino hammaslapaliitos on vahva jatkosliitos, joka kestää vetorasituksia. [28, s. 60] Jatkosliitoksen suositeltu pituus vaihtelee eri kirjallisuuslähteiden mukaan. Tämän tutkimuksen yhteydessä käytössä olleen lähdekirjallisuuden mukaan jatkosliitoksen ohjepituus on ollut noin 3-4 kertaa palkin korkeuden verran. [3, s. 32 & 48, s. 60]. Kuvassa 2.19 on esitetty kiilapalallinen vino hammaslapaliitos.



**Kuva 2.19** Kiilapalallinen vino hammaslapaliitos [28, s. 60]

Vinolla hammaslapaliitoksella jatkettu alapaarre on usein kannateltu alapuolelta kuvan 2.20 mukaisten riippuansaiden avulla. Tällöin alapaarteen vetorasituksia on saatu osittain siirrettyä myös yläpaarteen puristusrasitukseksi. Riippuansaiden avulla alapaarteen jänneväli pienenee, joten alapaarteeseen on voitu valita hoikempi palkkirakenne. Riippuansaat ovat niin sanottuihin riippuhirsiin kiinnitettyjä kannatusrautoja, jotka on varustettu kiristysruuveilla. Riippuhirren ja alapaarteen väliin on jätetty tavallisesti 5-10 senttimetrin rako, jolloin alapaarretta on voitu jälkikäteen nostaa siihen syntyneiden taipumien korjaamiseksi. Riippuhirret aiheuttavat pistemäisiä lisäkuormia kattoristikoiden yläpaarteisiin, mikä täytyy ristikon mitoituksessa ottaa huomioon. Lisäksi on huomiotava, että alapaarteen kiertyessä liitoksen rasitus saattaa kohdistua ainoastaan kuvan 2.20 mukaisen kannatusraudan toiselle puolelle. [3, s. 29, 32, 43]



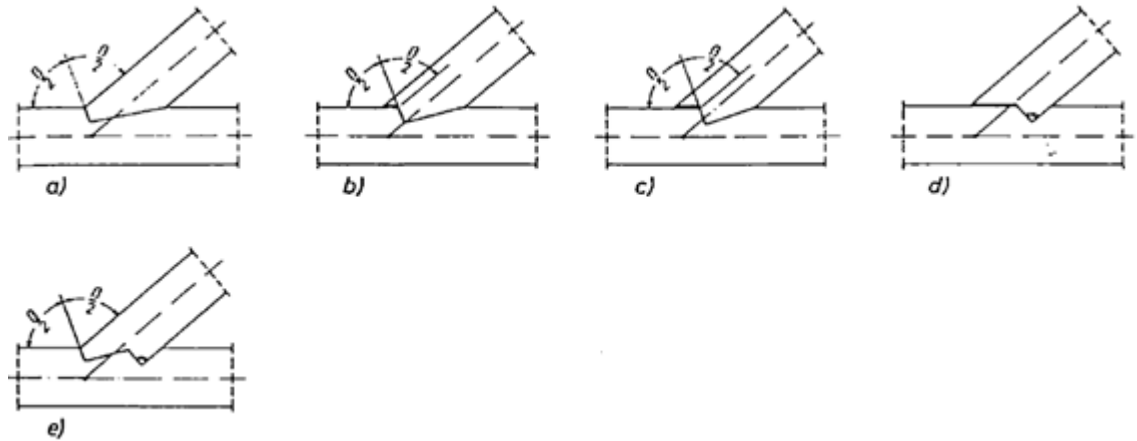
**Kuva 2.20** Riippuansaaalla kannatettu ristikon alapaarre [3, liitesivu 16]



Kuvassa 2.20 vinoa hammaslapaliitosta on vahvistettu pulttien avulla. Tällaisen jatkosliitoksen mitoitus perustuu ensisijaisesti kiilapalojen puristuskestävyyteen, mutta niiden pettäessä rasitus kohdistuu pääasiassa pulteille. Kiilapalojen murtuessa pulttien on kestävä liitokseen kohdistuva vetorasitus, joka jakaantuu pulttien leikkausrasitukseksi. Pulttiliitoksen kestävyyttä laskettaessa huomioidaan pultin myötölujuus ja ulosvetokeskkyvyys sekä puun reunapuristuslujuus [7, s. 54].

### 2.3.3 Loviliitos

Loviliitos on perinteinen kosketusliitostyyppi, jonka avulla siirretään tavallisesti kahdelta toisiinsa nähden vinosti sijoitetulta sauvalta puristusvoimia. Loviliitoksessa vinosauvaan voidaan tehdä loveus joko otsa- tai takapintaan, tai molempiin pintoihin. Vaakasauvan mitoituksessa täytyy erityisesti ottaa huomioon loveuksen takia paikallisesti pienentynyt poikkileikkauspinta-ala. [51, s. 409] Kuvassa 2.21 on esitetty vinosauvan erilaisia loveamistapoja.

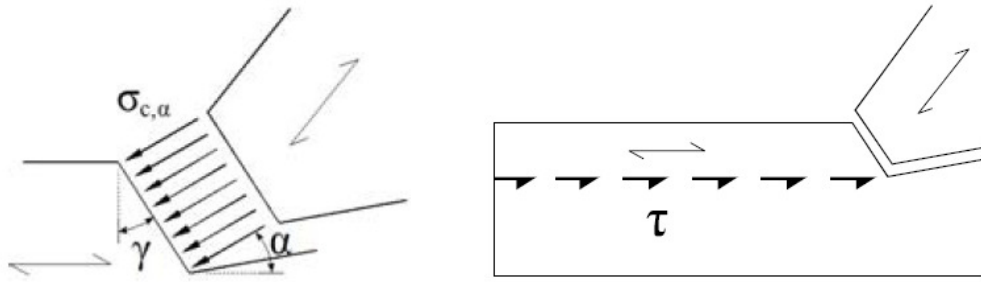


**Kuva 2.21** Erilaisia loviliitosmalleja [51, s. 44]

Loviliitoksissa on perinteisesti käytetty yhtä lovea (kuva 2.21 a-d), jos vinosauvan kaltevuuskulma vaakasauvaan nähden on ollut suuri ja vinosauvalta tuleva voima pieni. Kahta lovea on voitu käyttää (kuva 2.21 e), jos vinosauvan kaltevuuskulma on ollut pieni ja vinosauvalta siirtyvä puristusvoima on ollut suuri. [25, s. 371]

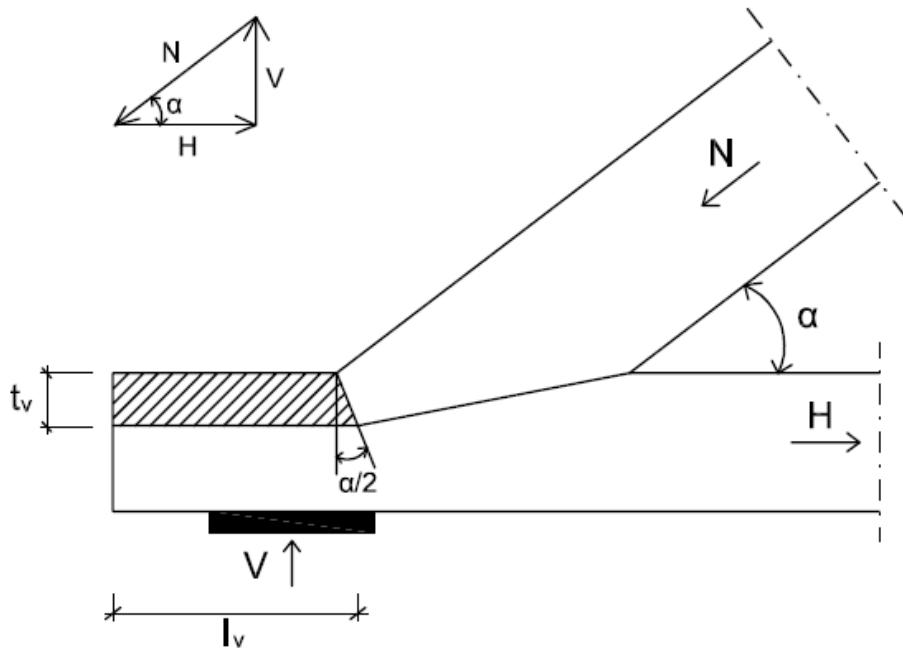
Loviliitoksen liittyvien sauvojen välisen kulman  $\alpha$  ollessa  $30\text{--}60^\circ$ , otetaan kuormia välittävänä osana huomioon vain otsapuun osuus [51, s. 411]. Kuvassa 2.22 havainnollistetaan loviliitoksessa vaikuttavia jännityksiä.





**Kuva 2.22** Loviliitoksessa vaikuttavia jännityksiä [36, s. 1]

Loviliitoksen mitoituksessa käytettäviä suureita on havainnollistettu kuvassa 2.23. Vinoviivalla rasteroitu alue on vaakapalkin leikkautuva osuus, jonka kapasiteetti perustuu lovetavan kappaleen leikkauspituuteen. Lisäksi on tarkistettava lovetun kappaleen puristuskkestävyys liitoksen otsapinnassa vaikuttavaa puristusjännitystä vastaan. [51, s. 411–412]



**Kuva 2.23** Loviliitoksen mitoitus

Otsapinnassa vaikuttava puristusjännitys saadaan laskettua kaavalla 2.3 [51, s. 412]

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_d \cdot \left(\cos \frac{\alpha}{2}\right)^2}{b_{ef} \cdot t_v} \quad (2.3)$$

missä

$\sigma_{c,\alpha,d}$  on puristusjännitys liitoksen otsapinnassa

$N_d$  on vinosauvalta tuleva aksiaalinen voima

$\alpha$	on vinosauvan kaltevuuskulma
$b_{ef}$	on vaakapuun loven leveys
$t_v$	on vaakapuun loven syvyys

Mikäli puristussauvan loveus on sauvan takapinnassa kuvan 2.21d mukaisesti, on vaakasauvan loveus tehty yleensä kohtisuorasti puristussauvan pituusakseliin nähden. Puristusjännitys vinosauvan lovetussa pinnassa saadaan tällöin kaavalla 2.4 [51, s. 412]

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_d \cdot \cos \alpha}{b_{ef} \cdot t_v} \quad (2.4)$$

missä

$\sigma_{c,\alpha,d}$	on puristusjännitys vinosauvan lovetussa pinnassa
$N_d$	on vinosauvalta tuleva aksiaalinen voima
$\alpha$	on vinosauvan kaltevuuskulma
$b_{ef}$	on vaakapuun loven leveys
$t_v$	on vaakapuun loven syvyys

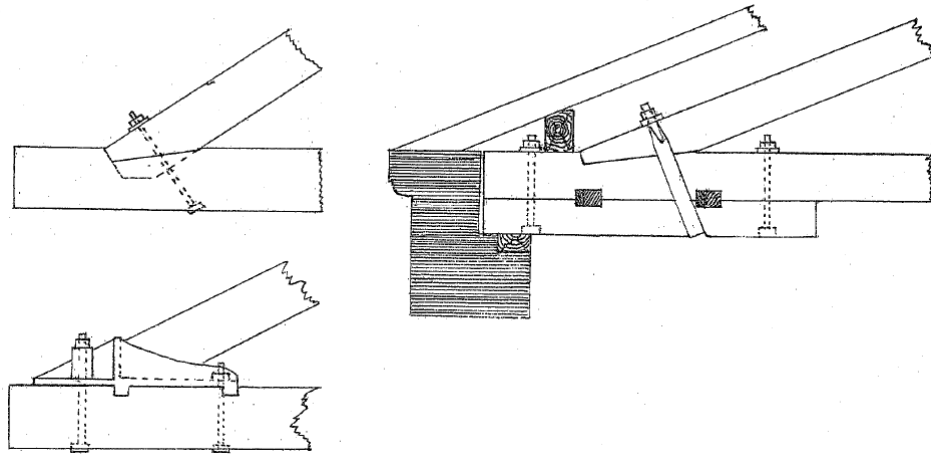
Loviliitoksessa vinosauvalta tuleva puristusvoiman vaakakomponentti aiheuttaa leikkausvoimia vaakapalkin lovettuun pintaan. Vaakapalkin lovetussa pinnassa vaikuttavan leikkausjännityksen on toteutettava ehto 2.5 [51, s. 412]

$$\tau_d = \frac{N_d \cdot \cos \alpha}{b_{ef} \cdot l_v} \leq f_{v,d} \quad (2.5)$$

missä

$\tau_d$	on vaakapalkissa vaikuttava leikkausjännitys
$N_d$	on vinosauvalta tuleva aksiaalinen voima
$\alpha$	on vinosauvan kaltevuuskulma
$b_{ef}$	on liittyvien puuosien pienin leveys
$l_v$	on vaakapalkin leikkautuvan osan pituus
$f_{v,d}$	on puun leikkauslujuus

Ristikoiden vinojen puristussauvojen liitokset alapaarteeseen on tehty perinteisesti vahvistettujen loviliitosten avulla kuvan 2.24 mukaisesti. Liitosta on tavallisesti vahvistettu pultin tai rautavyön avulla. Näissä on tavallisesti toisessa päässä ollut kierteet, jolloin niiden kiinnittämiseen käytettyjä muttereita on voitu jälkikäteen kiristää. Kiristämistarpeen ovat voineet aiheuttaa esimerkiksi puun kosteusmuodonmuutokset. [3, s. 30]



**Kuva 2.24** Vahvistettuja loviliitoksia [3, liitesivu 15]

Kuvan 2.24 oikean puoleisessa liitoksessa ristikon alapaarretta on vahvistettu alapuolelta erillisellä palkilla, jotta lovetun alapaarteen kestävyys puristussauvalta tulevan voiman vaakakomponenttia vastaan olisi riittävä. Kuvassa 2.24 on alimmaisessa liitoksessa valurautakenkä, jolla on voitu vastaanottaa puristussauvalta tulevat voimat ilman, että vinosauva on lovettu vaakasauvaan. [3, s. 30–31]

### 2.3.4 Lohenpyrstöliitos

Lohenpyrstöliitos on perinteinen liitostapa, jota on käytetty esimerkiksi konttikattotuoleissa käpälän ja selkäpuun liitoksessa tai kitapuun ja selkäpuun välisessä liitoksessa, joka oli tällöin vahvistettu usein myös puutapeilla. Lohenpyrstöliitoksen toiminta perustuu voimien siirtymiseen puristuksen kautta liitoksen kosketuspinnalta toiselle. Puun kosteusmuodonmuutokset heikentävät liitoksen toimintaa, sillä puun kutistuessa liitoksen puristuspinnat pienenevät ja liitokseen syntyy siirtymiä. [56, s. 54] Kuvassa 2.25 on esitetty lohenpyrstöliitos.



**Kuva 2.25** Lohenpyrstöliitos [13, s. 72]

Liitoksen kapasiteetin määrittelee kuvan 2.26 mukaan liitettävien osien välinen kulma  $\alpha$  ja lohenpyrstön kaltevuuskulma  $\beta$ . Liitoksen kestävyys lasketaan lovipinnoilla syntyvien puristusjännitysten ja lohenpyrstössä lovetun kolmionmallisen kappaleen leikkaus-

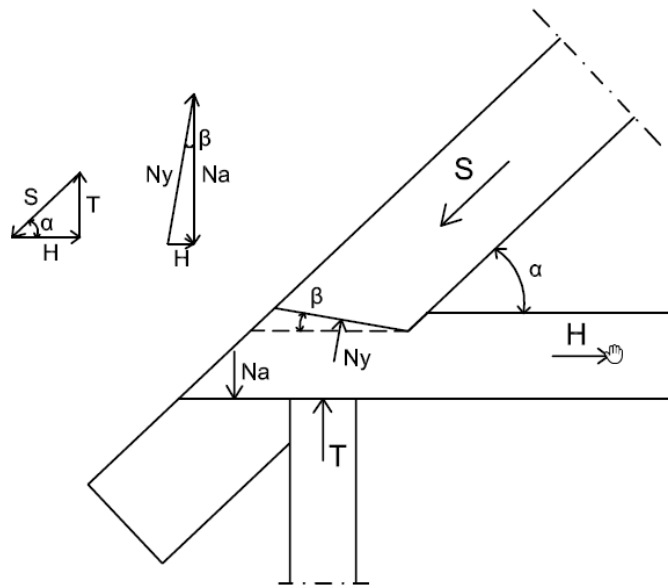
jännityksen perusteella. Liitoksessa vaikuttavat voimakomponentit saadaan laskettua seuraavilla kaavoilla 2.6–2.9 [56, s. 55–57]

$$T = S \cdot \sin \alpha \quad (2.6)$$

$$H = S \cdot \cos \alpha \quad (2.7)$$

$$N_a = H \cdot \tan(90^\circ - \beta) \quad (2.8)$$

$$N_y = \frac{H}{\cos(90^\circ - \beta)} = \frac{H}{\sin \beta} \quad (2.9)$$



**Kuva 2.26** Lohenpyrstöliitoksen voimasuureet [56, s. 57]

Edellä mainittujen kaavojen termit selviävät kuvasta 2.26. Lohenpyrstöliitoksen kestävyden laskennassa liitoksessa vaikuttavia voimia verrataan puun puristuskestävyyteen. Tarkasteltavasta voimakomponentista riippuen puristusrasitus voi olla joko puun syysuuntaa vastaan kohtisuoraa tai kohdistua vinosti syysuuntaan nähden. [56, s. 57]

Vanhoissa kattoristikoissa kitapuun ja selkäpuun välinen liitos on tavallisesti toteutettu puutapilla vahvistettuna lohenpyrstöliitoksena, kuten kuvassa 2.27. Tällaista liitosta ei ole vanhoissa ristikoissa suunniteltu kestävästi vetorasitusta. Esimerkiksi keskiaikaisissa kirkkoissa ei ole otettu huomioon, että voimakkaat tuulenpuuskat aiheuttavat lappeen suojan puolelle voimakasta imua, joka aiheuttaa vetorasitusta kitapuun ja selkäpuun liitokseen. Tällöin liitoksen lujuus perustuu liitoksessa käytetyn puutapin lujuuteen leikkaus- tai taivutusmurtoa vastaan, riippuen siitä, onko liitos tiukka vai onko siihen syntynyt puun kosteusmuodonmuutosten seurauksena väljyyttä. Tavallisesti jyrkkäkattoisten rakennusten, kuten kirkkojen ja tornien konttikattotuoleissa on käytetty useampia kitapuita. Tällöin alimpien kitapuiden liitokset ovat yleensä rasitetuimmat. [1, s. 13]



*Kuva 2.27 Puutapilla vahvistettu lohilapaliitos [18]*

Perinteisesti liitoksissa käytetyt puutapit tehtiin Suomessa koivusta. Puiset tapit ovat halkaisijaltaan 20–40 millimetriä. Puutappien toimivuuden kannalta on tärkeää, että tappeihin on käytetty alun perin muuta puurakennetta kuivempaa puuta, jolloin tapit ovat voineet imeä rakenteesta itseensä kosteutta ja liitos on kiristynyt. Puutappien lujuus on suurimmillaan, kun tapit on vuoltu puun syiden suunnassa katkaisematta syitä. [51, s. 31]

### 2.3.5 Vinokulmainen loviliitos

Vinokulmaista loviliitosta on käytetty vanhoissa kattoristikoissa esimerkiksi pystysauvojen ja vinosauvojen liitoksissa. Vinokulmaisia loviliitoksia on myös niin sanotuissa vitaposkirakenteissa, joita on käytetty rakennusten harjan suuntaisten, kitapuuta tukevien jalasorsien ja niiden pystytolppakannatusten tukemiseen. [3, s. 40]

Kuvan 2.28 mukaisen vinokulmaisen loviliitoksen mitoitus tehdään kuten tavallisen loviliitoksen mitoitus kohdassa 2.3.3, mutta lisäksi otetaan huomioon liitokseen syntyvä momentti. Liitokseen syntyy momenttia sekä ulkoisista kuormista että liitoksen sisäisestä voimansiirrosta. [56, s. 51] Mitoitukseen käytettäviä suureita on esitetty kuvassa 2.28.

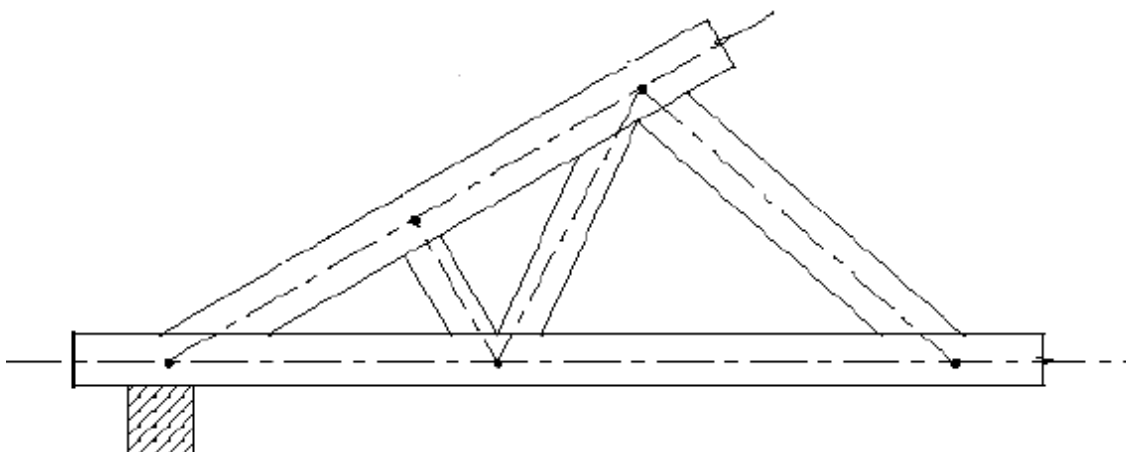


## 2.4 Kattoristikon rakenne ja toimintatapa

Kattoristikon tehtävänä on välittää siihen kohdistuvat ulkoiset kuormat eteenpäin kantaville rakenteille. Ristikoon kohdistuvat voimat aiheuttavat ristikkoon sisäisiä jännityksiä ja muodonmuutoksia. Laskennallisissa tarkasteluissa nämä eivät saa ylittää rakenteen suunnittelulujuuksia tai muodonmuutosrajoja. [13, s. 6]

Yleisissä ristikkomalleissa ristikon osia kuvataan kolmiulotteisilla suorilla sauvoilla, joilla on yhteensä kuusi vapausastetta. Ristikoiden mitoituksessa hyödynnetään kuitenkin usein kaksiulotteisia ristikkomalleja, joissa ristikko toimii staattisesti puhtaana tasorakenteena. Tällöin sen sauvoilla on kolme vapausastetta ja ristikon suunnittelu yksinkertaistuu. [51, s. 278]

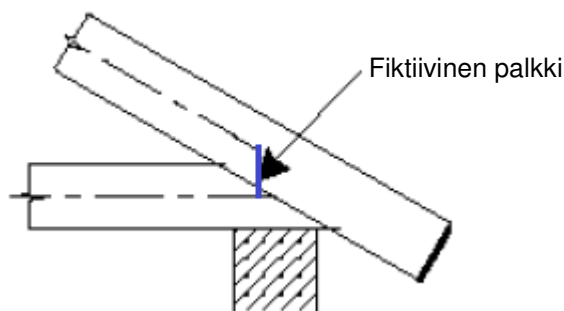
Puurakenteiden suunnitteluohjeen mukaan ristikot analysoidaan systeemiviivojen avulla. Ristikon mallinnuksessa kunkin systeemiviivan tulee sijaita sauvan poikkileikkauksen alueella. Mikäli diagonaali- ja vertikaalisauvojen systeemiviivat eivät sijaitse sauvan keskilinjalla, syntyy sauvaan voimien epäkeskisyyttä. Pääsauvoissa systeemiviivojen tulee sijaita sauvojen keskiakseleilla. Systeemiviivat liittyvät toisiinsa solmupisteiden kautta (kuva 2.29). [51, s. 279]



**Kuva 2.29** Systeemiviivat ja sauvojen solmupisteet ristikkomallissa [7, s. 33. Muokattu]

Ristikon mitoituksessa voidaan olettaa, että kaikki voimat siirtyvät solmupisteiden kautta. Ristikon yläpaarteeseen kohdistuva viivakuorma voidaan jakaa yläpaarten solmupisteisiin kohdistuviksi pistekuormiksi, jotka voidaan edelleen jakaa komponenteittain sauvojen rasituksiksi. [12, s. 167]

Ristikoiden epäkeskisiä liitoksia voidaan mallintaa fiktiivisten palkkien avulla. Niiden tulee suunnaltaan ja jäykkyydeltään vastata todellisen liitoksen rakennetta mahdollisimman tarkasti. [51, s. 280] Kuvassa 2.30 on havainnollistettu fiktiivisen palkin käyttöä ristikon mitoitusmallissa, kun ristikon liitoksessa on epäkeskisyyttä.



**Kuva 2.30** Fiktiivinen palkki ristikon liitoksessa [7, s. 33. Muokattu]

Ristikkoa mitoittaessa sauvojen liitokset voidaan yleensä olettaa nivelellisiksi. Uumasauvojen sijoittelulla voidaan optimoida paarteille syntyviä taivutusrasituksia ja puristettujen paarteiden nurjahduspituuksia. [51, s. 280–283]

Ristikoiden laskennallisessa tarkastelussa yläpaarre mitoitetaan yleensä puristettuna ja taivutettuna rakenteena, kun taas alapaarre mitoitetaan vedettynä ja taivutettuna rakenteena. Ristikon uumasauvat mitoitetaan normaalisti aksiaalisille voimille eli veto- tai puristusvoimalle. [51, s. 282–283]

Ristikoiden mitoituksessa alapaarretta voidaan tarkastella jatkuvana, vapaasti tuettuna palkkina. Alapaarre voidaan ajatella nivelellisesti tuetuksi jokaisesta solmupisteestä. Moniaukkoisen palkin laskennallisia tukimomentteja voidaan pienentää välitukien kohdalla 10 prosenttia solmupisteiden painumien ja liitosten osittaisen jäykkyyden perusteella. Vähennetyt tukimomentit lisätään kenttämomenttien laskentaan. [7, s. 34]

Tavallisesti vesikaton rakenteet mitoittavia kuormia ovat kattorakenteiden omapaino, lumikuorma, vesikaton hyötykuormat ja mahdollisten vesikatolle sijoitettavien kiinteiden laitteiden omat painot. Tuulikuorma kuuluu lyhytaikaiseen / hetkelliseen aikaluokkaan, jolloin se on määräävin tekijä kuormitusyhdistelyn aikaluokan valinnassa. Tällöin rakenteiden mitoituksessa voidaan käyttää suurempia materiaalilujuuksia, jolloin tuulikuorman sisältävä kuormitustapaus ei välttämättä muodostu epäedullisimmaksi kuormitustapaukseksi. [7, s. 23, 28] Jyrkissä ja korkeissa katoissa tuulikuorma pitää kuitenkin ottaa huomioon, sillä erityisesti tuulen imu saattaa aiheuttaa ristikon liitoksiin merkittäviä vetorasituksia [1, s. 13].



### 3. KATTORISTIKOIDEN VAURIOITUMINEN

#### 3.1 Yleisimmät vaurion aiheuttajat

Vanhoissa puisissa kattoristikoiden voidaan havaita aikojen saatossa syntyneitä vaurioitumista, mikä johtuu tavallisesti useista eri tekijöistä. Yleisimmät vauriot ovat luonnollisten tekijöiden aiheuttamia, mutta myös onnettomuuskuormat, kuten sodat ja tulipalot, ovat saattaneet vaurioittaa rakenteita. [24, s. 61]

Tavallisia puisten kattoristikoiden vaurioiden aiheuttajia ovat esimerkiksi vesikattovuodot ja kondenssiongelmat sekä rakenteisiin jälkeinpäin tehdyt ripustukset tai muut lisäkuormat, jotka ylittävät ristikon kapasiteetin [42, s. 4]. Vanhoissa rakennuksissa vesikaton materiaaleja on saatettu aikojen saatossa vaihtaa, jolloin yläpohjan rakennusfysiikkaalinen toiminta on voinut muuttua. Jälkikäteen ullakotiloihin asennettujen ilmanvaihtolaitteiden seurauksena saattaa syntyä kosteuden kondensoitumista, mikä voi aiheuttaa yläpohjan puurakenteisiin kosteusvaurioita. [52, s. 41] Lisäksi home- ja lahokasvustot tai liitoksien metalliosien korroosio ovat voineet vähentää ristikon kestävyttä [42, s. 4].

Joskus virheellisesti tehdyt korjaustoimenpiteet ovat saattaneet heikentää ristikoita esimerkiksi muuttamalla niiden kuormien jakautumistapaa. Myös rakennuksen puutteellinen ylläpito ja mahdolliset käyttämättömät ajanjaksot ovat saattaneet jättää jälkensä kantavien rakenteiden kuntoon. [24, s. 61] Rakenteiden vaurioitumista tarkasteltaessa olisi olennaista selvittää, milloin havaittuja ongelmia on alkanut syntyä. Siten rakenteiden vaurioitumista aiheuttaviin tekijöihin voitaisiin vastaisuudessa puuttua ja ehkäistä rakenteen vaurioitumista jatkossa. [42, s. 6]

Puurakenteiden vauriot voidaan tavallisesti jaotella selkeästi biologisiin ja kuormitusperäisiin vaurioihin. Biologiset vauriotekijät aiheuttavat yleensä puurakenteen tehollisten poikkileikkausalojen pienenemistä. Kuormitusperäiset vauriot saattavat aiheuttaa muodonmuutoksia koko puurakenteeseen, tai vastaavasti ne voivat kohdistua yksittäisiin rakenneosiin lisäten näin muiden rakenneosien rasitusta. [53]

#### 3.2 Puun biologinen vaurioituminen

Biologisesti vaurioitunut puu on rakenteeltaan huokoista ja haurasta sekä lujuusominaisuuksiltaan heikkoa [13, s. 12]. Puun biologinen vaurioituminen aiheuttaa rakenneosien tehollisten poikkileikkausalojen pienenemistä. Puurakenteen jäännöspoikkileikkaus arvioidaan tarkastelemalla puurakenteen biologisten vaurioiden määrää. Puurakenteen

jäännöspoikkileikkaus on puun nettopoikkileikkaus, jossa puun alkuperäisestä poikkileikkausalasta on vähennetty puun vaurioitunut osuus. Nettopoikkileikkauksen avulla määritetään puurakenteen jäljellä oleva kapasiteetti. [29, s. 43]

Yksi yleinen vanhojen puisten kattoristikoiden biologinen vaurioitumistapa on kosteaan tiilimuriin tuetun puurakenteen vaurioituminen [15]. Tällainen rakenne on esitetty kuvassa 3.1. Jatkuvan kosteuden vaikutuksesta puurakenteen lujuus heikkenee, jolloin esimerkiksi kosteaan tiilimuriin tuetun ristikon leikkauskestävyys saattaa ylittyä tukialueella [53].



**Kuva 3.1** Tiilimuriin tuetun puurakenteen lahovauriot [18]

Rakennusten säännöllisillä huoltotoimenpiteillä on selkeä yhteys puurakenteiden biologiseen vaurioitumiseen, sillä rakenteisiin kohdistuvat vesivuodot ja normaalia suurempi kosteusrasitus lisäävät puurakenteen lahoriskiä. Esimerkiksi tukkeutuneet sadevesikourut lisäävät tiilimuriin tuettujen puurakenteiden kosteusrasitusta sadeveden tulviessa kourun yli ja ohjautuessa tällöin suoraan ulkoseinän yläosaan. [11, s. 167]

Puisissa kattorakenteissa esiintyvät värimuutokset johtuvat usein vesikatteen vaurioitumisesta tai kosteuden kondensoitumisesta aiheutuneista valumista [42, s. 4]. Aluskatteen käyttö rakentamisessa on yleistynyt vasta 1930-luvun jälkeen, joten tätä vanhemmissa rakennuksissa vesikaton puurakenteet saattavat olla altistuneet kosteusvaurioille, jos vesikatteessa on esiintynyt vaurioita [11, s. 167]. Vanhoissa peltikatetuissa vesikattorakenteissa sisäilman kosteus voi talvella tiivistyä kylmän peltikatteen alapintaan, minkä seurauksena vesi valuu rakenteisiin. Havaitut kosteusjäljet voivat liittyä myös

vesivuotoihin ennen vesikattokorjausten tekemistä, jolloin vuotojälkien aiheuttaja on jo saatu poistettua. Joskus kosteusjäljet ovat saattaneet syntyä myös korjausaikaisen suojauksen laiminlyönnin seurauksena. [42, s. 20]

Puurakenteissa havaittava homekasvusto ja laho ovat merkkejä siitä, että kosteuspitoisuus puussa on ainakin jossain vaiheessa ollut pitkään korkea. Useimmiten syy puurakenteen homevaurioihin on liian korkeassa sisäilman kosteudessa. Kosteusvauriotapauksissa syy vaurion syntymiseen pitäisi selvittää, jotta rakenteen kosteusrasitusta voidaan vähentää. [42, s. 21]

Puurakenteen biologista vaurioitumista aiheuttavat erilaiset bakteerit, home-, sinistäjä- ja lahottajasienet sekä hyönteiset. Näistä merkittävimmät vaurionaiheuttajat ovat lahottajasienet, jotka lahottavat puun tärkeimpiä rakennusosia: selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä. Lahottajasienet tarvitsevat elääkseen ravintoa, kosteutta, happea sekä riittävän lämpötilan. Lahottajasienten kasvuille edullisimmat olosuhteet ovat +5–+30 °C:n lämpötila ja 20–60%:n pitkäaikainen kosteus puussa. [49, s. 74]

### 3.3 Kuormitusperäinen vaurioituminen

Rakenteeseen jälkikäteen tehdyt muutokset ja korjaukset saattavat merkittävästi vaikuttaa rakenteen kuormankantokykyyn. Kattorakenteisiin lisäkuormituksia aiheuttavia teki-joita ovat esimerkiksi rakennuksen ullakolle tai yläpohjaan tehdyt uudet IV-koneasennukset. [42, s. 15] Vesikatolle jälkikäteen asennetut lumiesteet ja kulkusillat saattavat aiheuttaa isojaikin kuormia lumen kerääntyessä katolle [23, s. 57]. Lisäksi kattorakenteisiin jälkikäteen tehdyt ripustuskuormat saattavat vaikuttaa ratkaisevasti rakenteen kestävyys [42, s. 15]. Ristikoiden kuormien lisääntymiseen voi johtaa myös esimerkiksi rakennuksen ullakkotilan käyttöönotto. Kattoristikoiden kestävyys ylittymiseen voi lisäksi johtaa niiden yläpaarteiden päälle tuettujen katto-orsien vaurioituminen, sillä ne toimivat ristikoiden jäykistävänä ja kuormaa jakavana rakenteena. [53]

Vanhoissa puurakenteissa niiden pitkä, jo saavutettu käyttöikä toimii yleensä todisteena siitä, että rakenteen kestävyys on ollut riittävä. Vanhoissa puisissa kattoristikoiden on yleensä käytetty poikkileikkaukseltaan melko massiivisia rakenneosia, joissa on kokonsa puolesta ylimääräistä rakenteellista varmuutta. Tällöin niiden kestävyys saattaa mahdollistaa kuormien lisäämisen ilman erillisiä vahvistustoimenpiteitä. Kuormia lisättäessä pitää rakenteen kapasiteetti kuitenkin rakennelaskelmien avulla tarkastaa. Joskus ristikoiden kuormia on saatettu merkittävästi lisätä ilman tarkempia rakenteellisia tarkasteluja, jolloin ristikoiden kestävyys on saattanut ylittyä. [53]

Ristikoiden kuormitusperäinen vaurioituminen ilmenee tavallisesti ristikon liitoksissa esiintyvänä vauriona. Vanhojen ristikoiden kirvesmiesliitoksiin saattaa syntyä rakoja ja siirtymiä muodonmuutosliikkeiden seurauksena. Liitosten vaurioitumisella on suuri merkitys ristikon toimintaan, sillä yleensä liitokset ovat ristikoiden heikoimpia kohtia.

[53] Kuvassa 3.2 on muodonmuutosten seurauksena siirtynyt ristikon vinosauva, joka on irronnut liitoksesta.



**Kuva 3.2** Ristikon vinosauvan ja yläpaarteen liitoksessa on rakoa [18]

Pitkillä jänneväleillä puuristikoiden alapaarteissa tai vaakapalkeissa saattaa esiintyä rakenneosan kallistumista. Palkkirakenteen kallistuminen voi johtua esimerkiksi sen painumisesta tukeen tai liian heikosta tai puuttuvasta sivuttaistuennasta. Kallistuminen heikentää rakenneosan kestävyyttä, sillä tällöin sen jäyhyysakseli siirtyy. [42, s. 24]

Tavallisesti puurakenteet sallivat melko suuretkin taipumat. Taipumat voivat vaatia kuitenkin erityistarkasteluja, jos ne vaikuttavat silmämääräisesti arvioituna epätavallisen suurilta. Joissakin tapauksissa puurakenteiden taipumasta pitää olla huolestunut myös silloin, jos yksittäisen kannattajan taipuma on selvästi viereisten kannattajien taipumia suurempi. [42, s. 24]

Puurakenteen ylikuormittaminen voi johtaa rakenteen halkeiluun. Halkeaman vaarallisuus riippuu sen leveydestä ja sijainnista sekä halkeilleeseen rakenteeseen kohdistuvasta rasituksesta. Puhtaasti vedettyjen tai puristettujen rakenteiden halkeamat ovat yleensä vaarattomampia kuin taivutettujen rakenteiden halkeamat. Taivutetuissa rakenteissa halkeamat ovat erityisen vaarallisia, jos ne sijaitsevat suurten leikkausvoimien alueella. Puhtaasti vedetyillä rakenteilla lähinnä liitosalueiden halkeamilla on merkitystä, sillä ne alentavat liitosten kestävyyttä. Puristetuissa rakenteissa esiintyvät isot halkeamat saattavat heikentää rakenteen nurjahduskapasiteettia. Rakenteissa, joihin kohdistuu syitä vastaan kohtisuoria vetorasituksia, ovat halkeamat lähes aina vaarallisia. [39, s. 18]



Puurakenteeseen syntyvät halkeamat eivät läheskään aina ole kuormitusperäisiä. Puuhun syntyy normaaleja, puun kuivumiskutistumasta aiheutuvia halkeamia, jos puurakenteessa vaikuttaa epätasainen kosteusjakauma ja sen muodonmuutokset ovat estettyjä. Epätasaisen kosteusjakauman puurakenteessa aiheuttavat vaihtelevat kosteusolosuhteet puurakenteen ympäristössä. Puun muodonmuutosliikkeitä estävät esimerkiksi tukien ja liitosalueiden teräskiinnitykset. [17, s. 11] Tällöin puurakenteen sisäiset jännitykset ylittävät materiaalin lujuuden ja rakenteeseen syntyy halkeamia. Puun kuivumiskutistumisen seurauksena syntyvät halkeamat ovat yleensä melko leveitä ja ne ovat puun syysuuntaisia. [13, s. 7] Kuvassa 3.3 on puun kuivumiskutistumisesta aiheutunut halkeama.



**Kuva 3.3** Puurakenteen kuivumiskutistumahalkeama [18]

Puu on viskoelastista ainetta, jossa tapahtuu ajan myötä virumaa eli pysyviä muodonmuutoksia, kun rakenne on tasaisen jännityksen alaisena. Puurakenteen virumaan vaikuttavat rakenteen kuormitusajan ja kosteuspitoisuuden lisäksi myös sen jännitystaso ja lämpötila. Suunnittelussa käytettävä virumakerroin ( $k_{\text{def}}$ ) ottaa huomioon vain kuormitusajan ja kosteuspitoisuuden. [51, s. 184] Jännitystason suuruudella on vaikutusta virumanopeuteen ja siten rakenteen murtoaikaan. Käytännössä jännitystasot ovat kuitenkin niin alhaisia, ettei niillä ole suurta merkitystä virumanopeuteen. Lämpötilan vaikutus alle 50 °C:n lämpötiloissa on pieni ja se voidaan lähes aina jättää huomioimatta. [51, s. 185]

## **4. VANHOJEN PUURAKENTEIDEN LUJUUDEN ARVIOINTI JA TUTKIMINEN**

### **4.1 Tarvittavat taustatiedot ja havainnot**

Olemassa olevien puurakenteiden nykykuntoa tarkasteltaessa ja niiden käyttöturvallisuutta arvioitaessa on tutkittava puurakenteen jäljellä olevia mekaanisia ominaisuuksia. Historiallisesti ja kulttuurisesti arvokkaita puurakenteita on suositeltavaa tutkia sekä ainetta rikkomattomien menetelmien että silmämääräisen tarkastelun avulla. Ainetta rikkomattomat tutkimusmenetelmät sisältävät monia epätarkkuustekijöitä, joten puurakenteita tutkittaessa tulisi yhdistellä useita eri tutkimusmenetelmiä. Epätarkkuutta tutkimusmenetelmistä saataviin tuloksiin aiheuttavat puun luontaisen epähomogeenisuuden lisäksi muun muassa menetelmien mittavirheet ja puurakenteen tutkijan tapa tulkita mittaustuloksia. [37, s. 267]

Ennen rakenteiden tarkempaa katselmointia olisi hyvä etsiä tietoa rakennuksen historiasta. Olennaista on selvittää muun muassa se, onko rakennetta aikojen saatossa jo korjattu tai vahvistettu. [29, s. 957] Vanhat puurakenteet ovat tavallisesti yksilöllisiä rakenteita, joten kattoristikot saattavat samassakin rakennuksessa olla keskenään hieman erilaisia [24, s. 65].

Historiallisesti arvokkaiden puurakenteiden säilyttämistä varten nykyiset rakenteet on hyvä dokumentoida. Rakenteista on hyvä laatia mittapiirustukset, joissa esitetään rakenteen geometria sekä mahdolliset näkyvät muodonmuutokset. Mittapiirustuksista voidaan havainnoida myös rakenteen mahdollisia ongelmakohtia, joita voisi olla muutoin vaikea hahmottaa. Dokumentoinnin perusteella voidaan seurata rakenteen vauriokehitystä tulevaisuudessa. [24, s. 65]

### **4.2 Rakenteellisen turvallisuuden tarkastelu**

Rakenteellisella turvallisuudella tarkoitetaan rakennuksen kantavien rakenteiden ja eikantavien rakenteiden kiinnitysten riittävää kestävyyttä kantamaan rakennuksen elinkaaren aikana rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset. Rakenteiden tarkastuksen yhteydessä tulisi kiinnittää huomiota erityisesti rakenteiden ja rakenneosien teknisiin puutteisiin ja virheisiin, rakenteen ikääntymisestä johtuviin muutoksiin sekä mahdollisiin rakennuksen alkuperäisestä tilanteesta poikkeaviin olosuhteisiin. Teknisiä puutteita ja vikoja ovat esimerkiksi rakenteen alimitoitus, kuormien aliarviointi, jäykistykseen puutteellisuus ja rakenteen laskentamallin virheellisyys. [44, s. 9]

### 4.2.1 Vesikattorakenteiden kunnon tarkastaminen

Vesikattorakenteiden kuntoa tutkittaessa on syytä huomioida muun muassa seuraavat asiat [23, s. 57]:

- rakenteiden vastaavuus suunnitelmiin
- rakenteiden ympäristöolosuhteet
- rakenteiden kantavuus
- vesikaton ja yläpohjan lämpö- ja kosteustekninen toimivuus
- yläpohjan ja vesikaton vauriot ja niiden laajuus, syyt ja seuraukset.

Kattavien rakennesuunnitelmien säilyminen vuosikymmeniä vanhoista rakennuksista on harvinaista, mutta tavallisesti arvokohteista löytyy vähintään joitakin luonnospiirustuksia. Jo näihin vertaamalla voidaan saada havaintoja siitä, onko rakenteita jälkikäteen olennaisesti muutettu. [23, s. 57]

Kattorakenteita havainnoitaessa tulee kiinnittää huomiota rakenteisiin kohdistuviin lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. Esimerkiksi yläpohjan tuulettuvuudella ja lämmöneristävyydellä on suuri merkitys puurakenteiden kosteuspitoisuuteen. Myös kattokaltevuudella on merkitystä, sillä loivilta katoilta sadevesien ja lumien poistuminen on hitaampaa, ja yhdessä vesikatteen vaurioiden kanssa tämä saattaa lisätä kantavien kattorakenteiden kosteusrasitusta. [23, s. 57]

Kantavissa kattorakenteissa tulee tarkastella rakenteisiin kohdistuvia kuormituksia ja rakenteiden kannatusten ja kiinnitystapojen varmuutta. Tärkeintä on tunnistaa kattorakenteissa havaitut vaurioilmiöt ja selvittää niiden syitä, laajuutta ja sijaintia, ja näiden pohjalta pohtia vaurioiden vaikutusta rakenteen kantavuuteen. [23, s. 57]

### 4.2.2 Vanhan kattoristikon kantavuuden arvioiminen

Vanhan kattoristikon kantavuutta voidaan arvioida seuraavalla tavalla:

1. Määritetään ristikon sauvojen todelliset lujuudet [24, s. 70]
2. Arvioidaan liitosten ja tukialueiden voimansiirtokyky [24, s. 70]
3. Muodostetaan tutkittavan ristikon rakennemalli [24, s. 70]
4. Määritetään ristikon laskennallinen kapasiteetti sekä käyttöaste [29, s. 957]
5. Verrataan mahdollisia kuormitusperäisiä vaurioita rakenneanalyysin tuloksiin [24, s. 70]

Ristikon sauvojen todellisia lujuuksia voidaan arvioida sekä silmämääräisesti että ainetta rikkomattomilla tutkimusmenetelmillä [37, s. 267]. Vanhojen puurakenteiden lujuuden arviointia ja tutkimista käsitellään myöhemmin tämän työn luvuissa 4.3 ja 4.4. To-

dellisiä lujuuksia arvioitaessa otetaan huomioon ristikon mahdollinen biologinen tai kuormitusperäinen vaurioituminen [53].

Kantavia kattorakenteita tarkasteltaessa tulee kiinnittää huomiota erityisesti pääkannattimien ja niiden liitosten kuntoon, jäykistäviin rakenteisiin ja niiden liitoksiin sekä sekundäärikannattimien ja niiden liitosten kuntoon [42, s. 4]. Puurakenteiden liitoksia tarkasteltaessa tulee havainnoida erityisesti liitoksissa esiintyviä siirtymiä ja halkeamia sekä liitosten tukipintoja [42, s. 15]. Vanhoissa puurakenteissa on saattanut tapahtua muodonmuutosliikkeitä, joiden seurauksena voimat eivät enää pääse välittymään suunnitellulla tavalla liitoksissa [24, s. 70]. Puurakenteen painumat tukipinnan kohdalla viittaavat liian pieneen tukipinta-alaan. Rakenteen tukialueilla on syytä kiinnittää huomiota myös siihen, miten kuormat pääsevät välittymään eteenpäin kantaville rakenteille. [24, s. 70]

Olemassa olevien kattoristikoiden kestävyyskäsitteitä tarkasteltaessa tulee selvittää, millaisia rasituksia ristikon eri osiin kohdistuu [24, s. 70]. Kestävyystarkasteluissa tulee huomioida erityisesti ristikon vaurioituneella alueella vaikuttavat rasitukset ja vaurioitumisen aste [39, s. 18]. Ristikon kokonaistarkastelun perusteella voidaan muodostaa sen nykytilanteen mukainen rakennemalli, josta ristikon sauvojen ja liitosten rasituksia voidaan tarkastella erilaisilla kuormitusyhdistelmillä. [24, s. 70]

Vaurioituneen kattoristikon kestävyys määritetään vertaamalla siihen kohdistuvia todellisia kuormia ristikon kapasiteettiin. Laskennallisissa tarkasteluissa ristikkoon kohdistuvien kuormien on oltava kuitenkin aina vähintään viranomaisvaatimusten vähimmäiskuormien mukaisia. [39, s. 18] Ristikon nykytilanteen mukainen käyttöaste lasketaan muodostetun rakennemallin perusteella voimassa olevien suunnittelustandardien mukaan [29, s. 957]. Rakennelaskelmien perusteella saadaan rakenteen käyttöaste, joka tulee olla aina alle 1,0 eli alle 100 prosenttia rakenteen laskennallisesta kapasiteetista. [39, s. 18]

Edellä mainittujen määritysten perusteella voidaan tutkittavalle kattoristikolle muodostaa erilaisia rakennemalleja, joista saatavia rakenneanalyysijä verrataan keskenään. Laskennallisen rakenneanalyysin tuloksia verrataan rakenteen todelliseen käyttäytymiseen. [24, s. 70]

### 4.3 Puurakenteiden lujuuden arviointi

Puurakenteiden lujuutta voidaan arvioida rakenteen silmämääräisen tarkastelun avulla. Silmämääräisellä tarkastelulla pyritään arvioimaan rakenteessa käytetty puulaji ja sen laatu sekä puurakenteessa esiintyvät viat ja poikkeavuudet. Puurakenteesta etsitään luonnollisten vikojen lisäksi mahdollisia biologisia ja mekaanisia vaurioita. Silmämääräisessä tarkastelussa tehdään havaintoja erityisesti halkeamista, oksista, reaktiopuusta, lahovaurioista ja kosteusjäljistä, sekä mahdollisten tuholaisten tai sienikasvuston ole-



massaolosta. [29, s. 958] Paikan päällä tehtävässä puurakenteen lujuusluokittelussa voidaan huomioida puun luonnollisten vikojen sijainti rakenteen kuormitusten kannalta. Esimerkiksi puurakenteen vetopuolella kriittisessä poikkileikkauksessa sijaitsevat oksat heikentävät puurakenteen taivutuskestävyyttä. [37, s. 273]

Puun luonnollisista vioista oksilla on suurin merkitys puurakenteen lujuusominaisuuksiin. Oksien ympärillä tapahtuu syyn suuntien suunnanmuutoksia ja samalla puurakenteen tehollinen poikkileikkaus on oksien kohdalla pienempi. Siksi silmämääräisen lujuuslajittelun yhtenä kriteerinä on oksien koko, määrä ja sijainti. Oksien vaikutus puun lujuuteen riippuu tutkittavasta puulajista, mikä tulee huomioida lujuuslajittelussa. [37, s. 271]

Vanhojen puurakenteiden lujuusluokittelussa voidaan käyttää harkiten samaa lujuusluokittelutapaa kuin uuden sahatavaran luokittelussa. Silmämääräisen lujuusluokittelun haasteita vanhoissa rakenteissa ovat rakenteen piilossa olevat pinnat, mahdolliset lahovauriot ja massiiviset poikkileikkaukset. Kaikkia kasvuvikoja ja vaurioita ei välttämättä pystytä havaitsemaan olemassa olevista rakenteista, sillä yleensä olemassa olevien rakenteiden kaikki pinnat eivät ole tarkasteltavissa. Uuden sahatavaran lujuuslajitteluohjeissa ei ole lahovaurioita huomioon ottavia tekijöitä. Vanhojen puurakenteiden massiivisissa poikkileikkauksissa on usein mukana puun ydin, joka sijaitsee epäkeskeisesti poikkileikkauksen keskipisteeseen nähden. Tämä aiheuttaa epäjatkuvuutta poikkileikkauksen lujuusjakautumaan. [52, s. 40]

Eurooppalaisen lujuusluokittelustandardin [45] mukaan puurakenteen lujuusluokan määrittelevät puun taivutuslujuus, taivutusjäykkyys ja tiheys. Puun tiheydestä ja taivutusjäykkyyydestä määritetään keskiarvot ja ominaisarvot. Kun puurakenteen lujuusluokan saadaan edellä mainittujen ominaisuuksien perusteella määritettyä, voidaan olettaa, että myös muut puurakenteen lujuusominaisuudet vastaavat kyseisen lujuusluokan arvoja. [37, s. 270] Kuvassa 4.1 on puun visuaalisessa lujuuslajittelussa käytettävä taulukko, jonka mukaan puun lujuus arvioidaan.

PÄÄLÄADUT		A	B	C
OKSIEN SALLITTU ENIMMÄISMÄÄRÄ HUONOIMMALLA 1 METRIN OSUUDELLA				
Lappeella, terveet ja kuivat oksat / joista kuorioksia <sup>1)</sup>		4/2	5/3	8/4
Syrjällä, terveet ja kuivat oksat / joista kuorioksia <sup>1)</sup>		2/1	3/2	4/3
LAPEOKSIEN KOKO				
Sahatavaran paksuus mm	Sahatavaran leveys mm	Terveen lapeoksen läpimitta enintään mm		
16,19,22,25	75, 100, 115	20	35	50
	125,150	25	40	55
	175,200,225	30	45	60
32,38	75, 100, 115	25	40	55
	125,150	30	45	60
	175,200,225	35	50	65
44,50	75, 100, 115	30	45	60
	125,150	35	50	65
	175,200,225	40	55	70
63,75	75, 100, 115	35	50	65
	125,150	40	55	70
	175,200,225	45	60	75
SYRJÄOKSIEN KOKO				
Sahatavaran paksuus mm	Terveen syrjäoksen läpimitta enintään mm			
16,19	18	•	•	
22,25	20	•	•	
32,38	28	30	•	
44,50	30	40	•	
63,75	35	50	•	
MUIDEN OKSIEN KOKO ULKOLAPPEELLA JA SYRJÄLLÄ				
Oksatyyppi <sup>2)</sup>	Oksan läpimitta enintään % em. terveen oksan mitasta			
Ryhmäoksa	70	70		80
Kuiva oksa	70	70		100
Kuoren ympäröimä oksa	50	60		80
Laho oksa		50		80

<sup>1)</sup> laaduissa B ja C ei enintään läpimitaltaan 10 mm suuristen terveiden tai kuivien oksien lukumäärälle ole asetettu rajoituksia laaduissa B ja C sallitaan myös laho-oksa  
laadussa C sallitaan myös enintään läpimitaltaan 15 mm suuriset oksanreiät tai irto-oksat  
• oksan halkaisija on yhtä suuri kuin sahatavaran paksuus  
<sup>2)</sup> laaduissa A ja B oksat eivät saa olla irtonaisia.

#### Kuva 4.1 Puun visuaalisen lujuuslajittelun ohjeet [45, s. 10]

Uuden sahatavaran taivutuskestävyys määritetään erillisellä taivutuskokeella. Myös vanhan puurakenteen taivutuslujuus voidaan määrittää tarkasti, mutta se vaatii ainetta rikkovia tutkimusmenetelmiä. Olemassa olevia historiallisesti arvokkaita puurakenteita tutkittaessa tällaiset kokeet eivät kuitenkaan ole yleensä mahdollisia, joten käytännössä vanhan puurakenteen lujuusluokittelu perustuu epäsuoriin menetelmiin, joissa puurakenteen muita ominaisuuksia määrittämällä arvioidaan puun taivutuslujuus. [37, s. 269]

Useilla havupuulajeilla vuosirenkaiden leveys korreloi kääntäen puun tiheyden kanssa. Kevätpuuta on yleensä suhteellisesti enemmän kuin kesäpuuta ja se on myös tiheämpää. Siten vuosirenkaan leveyden mittaaminen on sisällytetty yhtenä kriteerinä puun silmämääräiseen lujuuslajitteluun. Olemassa olevan puurakenteen poikkileikkauspintoja ei välttämättä saada paljastettua, mutta vuosirenkaiden leveys saadaan määritettyä esimerkiksi mikroporauksella, jota käsitellään myöhemmin luvussa 4.4. [37, s. 270]

#### 4.4 Arvokohteiden puurakenteiden ainetta rikkomattomat tutkimusmenetelmät

Puurakenteiden ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä on useita erilaisia, mutta menetelmät eivät yksinään anna riittävästi tietoa tutkittavasta rakenteesta. Osa ainetta rikkomattomista tutkimusmenetelmistä antaa rakenteesta vain paikallista tietoa. Siksi erilaisia tutkimusmenetelmiä on tarpeen yhdistää. Puurakenteiden ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä ovat esimerkiksi kosteusmittaukset, ultraäänimittaus, mikroporaus ja Pilodynin koe. Ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä käytettäessä on kuitenkin huomioitava puun kosteuspitoisuuden vaikutus, puurakenteen luonnolliset vaihtelut, vuosirenkaiden jakauma ja puun ikä. [32, s. 2, 4]

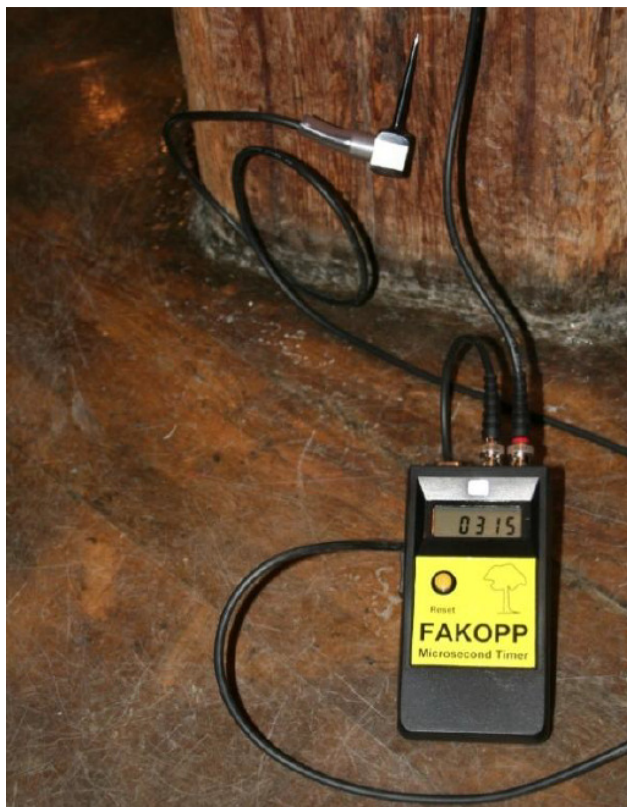
Ultraäänimittausten avulla voidaan tutkittavasta puurakenteesta paikallistaa kohtia, jotka vaativat tarkempaa tutkimusta. Näiden mittausten perusteella paikallistetut kohdat voidaan tutkia tarkemmin esimerkiksi röntgensäteilyn avulla. Tulosten vertailtavuuden vuoksi puurakenteesta on hyvä tutkia selkeiden vauriokohtien lisäksi myös terveitä alueita. Röntgensäteilyn perusteella voidaan rakenteesta valita pisteitä, joista mikroporauksen avulla selvitetään puun tiheyttä ja koostumusta. Lisäksi mikroporauskohtia voidaan sijoittaa ultraäänimittauksilla paikallistettuihin vauriokohtiin. [19, s. 23]

Olemassa olevan puurakenteen kosteuspitoisuus vaihtelee rakenteen sisällä. Puurakenteen kosteuspitoisuuden arviointi on tärkeää, sillä kosteuspitoisuus vaikuttaa puun mekaanisiin ominaisuuksiin. [37, s. 274] Puurakenteen kosteutta voidaan mitata esimerkiksi tähän tarkoitukseen suunnitellulla kosteusmittarilla (kuva 4.2), jossa on antureina puurakenteeseen upotettavat pienet piikit. Mitatun kosteuspitoisuuden perusteella voidaan arvioida, ovatko rakenteen kosteusolosuhteet otolliset lahottajasienille. Tavallisesti kosteusmittarin toiminta perustuu puun kykyyn vastustaa sähkövirtaa. Kosteaa puu johtaa hyvin sähköä, mutta kuiva puu toimii sähköä eristävänä materiaalina. [24, s. 69]



**Kuva 4.2** Puun kosteusmittari [24, s. 69]

Jännitysaalloilla tehtävä tutkimus soveltuu ainetta rikkomattomana menetelmänä suojeltavien puurakenteiden tutkimiseen. Menetelmä perustuu rakenteeseen lähetettävään jännitysaaltoon, jonka käyttäytymistä rakenteessa tutkitaan. Aallot voivat olla joko ultraääniaaltoja tai iskuaaltoja, joita voidaan tuottaa esimerkiksi vasaralla. [19, s. 12–14] Kuvassa 4.3 on jännitysaaltomittari, jolla voidaan mitata iskuaallon nopeutta rakenteessa.



**Kuva 4.3** Jännitysaaltomittari [32, s. 8]

Ultraäänellä tuotettavilla aalloilla voidaan korkeamman taajuuden takia havaita pienempiä vaurioita kuin iskuaalloilla, mutta korkeampitaajuuksinen aalto myös vaimenee ja menettää energiaansa nopeammin kuin pienitaajuuksinen aalto. Tämä rajoittaa tutkittavan rakenteen kokoa. Menetelmässä asennetaan aallon lähetin ja vastaanotin tunnetuille etäisyyksille toisistaan, ja lähetetyn aallon etenemisnopeutta mitataan. Puurakenteen pituussuuntaan lähetettävästä aallosta mitataan aallon etenemisnopeutta rakenteessa. [19, s. 12–14] Kun puurakenteen tiheys tunnetaan, saadaan aallonnopeuden avulla laskettua puun dynaaminen kimmokerroin yhtälöstä 4.1 [4, s. 8].

$$E_d = V^2 \cdot \rho \quad (4.1)$$

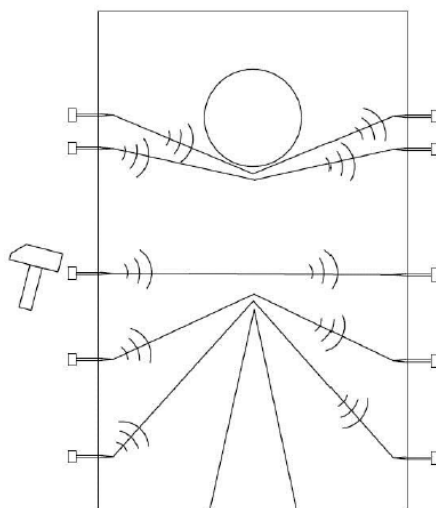
missä

$E_d$  on dynaaminen kimmokerroin

$V$  on aallon nopeus

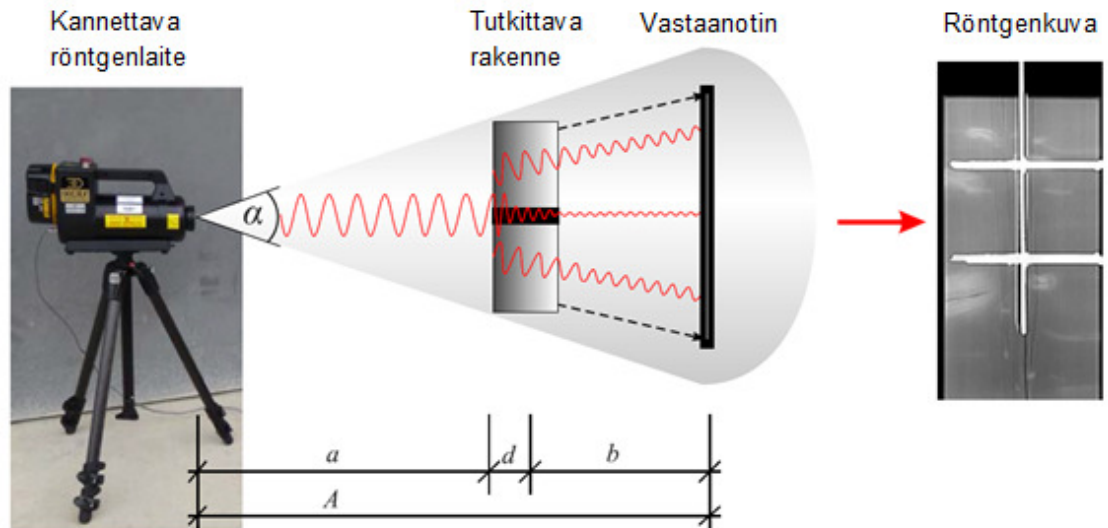
$\rho$  on materiaalin tiheys

Aallon etenemisestä saatava tieto riippuu aallon lähetyssuunnasta. Pituussuuntaan lähetetyt aallot eivät anna tietoa rakenteen vaurioitumisesta, sillä aallot kulkevat lähettimestä vastaanottimeen nopeinta mahdollista reittiä. Pituussuuntaan lähetetyt aallot soveltuvat siis lähinnä puun dynaamisen kimmokertoimen määrittämiseen edellä esitetyn mukaisesti. Puun poikittaissuuntaan lähetetyillä aalloilla taas voidaan havaita rakenteessa esiintyviä vaurioita. Vaurioitumattomassa rakenteessa aallon amplitudi pienenee tasaisesti, kun taas vaurioituneessa rakenteessa aalto käyttäytyy epäsäännöllisesti. Puurakenteen mahdolliset palosuoja- ja lahonsuoja-aineet saattavat haitata aallon kulkeutumista rakenteessa, samoin kuin puun korkea kosteuspitoisuus. Lisäksi puun vaurioitumisen myötä syntyneet tyhjätilat ja halkeamat saattavat aiheuttaa virhettä mittaustuloksiin. [19, s. 12–14] Kuvassa 4.4 on havainnollistettu puun vaurioiden vaikutusta aallon etenemiseen rakenteessa.



**Kuva 4.4** Halkeamien ja tyhjätilojen vaikutus aallon etenemiseen [19, s. 14]

Puurakenteiden vaurioita voidaan havaita myös röntgenkuvauksella, jonka periaatetta on havainnollistettu kuvassa 4.5. Menetelmä perustuu säteilyn absorptioon kulkiessaan rakenteen läpi. Menetelmässä mitataan säteilyn intensiteetin pienenemistä, minkä perusteella pystytään määrittämään absorptiokerroin, joka kertoo materiaalin tiheyden. Säteilyn vaimenemisnopeus on verrannollinen puurakenteen tiheyteen, paksuuteen, koostumukseen ja käytetyn säteilyn säteilyenergiaan. [32, s. 9] Puun tiheys riippuu sen vaurioista, joten röntgensäteilyn avulla voidaan kartoittaa puurakenteen vaurioituneita alueita. Röntgensäteilyn avulla voidaan havaita myös rakenteen sisäisiä halkeamia, koloja ja metallisten liitososien plastisia muodonmuutoksia, joita ei muilla ainetta rikkomattomilla menetelmillä voida havaita. Nykyaikaisilla kannettavilla röntgensäteilylaitteilla voidaan puurakenteen kuntoa tutkia paikan päällä. [10, s. 1]



**Kuva 4.5** Röntgenkuvauksen periaate [10, s. 2. Muokattu]

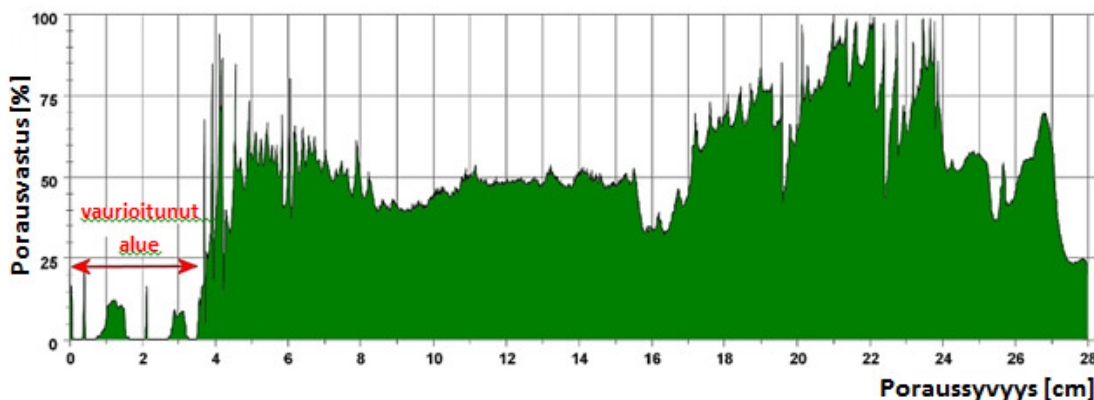
Puun lujuutta voidaan arvioida mikroporausken avulla. Menetelmää voidaan pitää aineita rikkomattomana, sillä poraukseen käytettävän terän halkaisija on ainoastaan 1,5–3,0 mm. Menetelmä perustuu porausvastuksen mittaamiseen, kun poranterää pyöritetään vakionopeudella. [32, s. 5] Kuvassa 4.6 on havainnollistettu puurakenteen mikroporaus-



**Kuva 4.6** Mikropora [32, s. 5]

Mikroporauslaitteisto tulostaa automaattisesti kuvan 4.7 mukaisen kuvaajan, jossa on esitetty porausvastus poraussyvyyden funktiona. Kuvaajassa olevat piikit kuvaavat suurta porausvastusta, mikä merkitsee puun suurta tiheyttä ja matalat pisteet taas merkitsevät pientä porausvastusta ja siten puun pientä tiheyttä. Kuvaajaan piirtyy vaakasuora viiva, jos puussa ei ole ollenkaan porausvastusta, mikä merkitsee vaurioitunutta puuta.

Porausvastuksen avulla saadaan siis selville puun tiheysvaihtelut ja mahdolliset porauskohdassa esiintyvät vauriot. [4, s. 5-6]



**Kuva 4.7** Mikroporausken tuottama kuvaaja [4, s.7]

Mikroporausken käytettäessä tulee tuntee puun tyyppi, jotta välttään kuvaajan vääriä tulkinnoita. Esimerkiksi lehtipuiden tiheys on pienempi sydänpuun läheisyydessä, mikä voidaan virheellisesti tulkita vaurioituneeksi puuksi. [19, s. 15] Kuvaajasta voidaan havaita kevätpuun ja kesäpuun vaihtelut näiden erilaisten tiheyksien vuoksi [4, s. 5-6]. Mikroporaus antaa puun rakenteesta tietoa vain paikallisesti, joten porauskohdat tulee etukäteen määrittää muilla menetelmillä, kuten esimerkiksi ultraäänikokeilla tai röntgenkuvauksella. [19, s. 15]

Puun lujuutta voidaan testata Pilodynin kokeen avulla, joka on esitetty kuvassa 4.8. Pilodynin koe perustuu teräspuikon tunkeumasyvyyteen puurakenteeseen. Halkaisijaltaan 2.5 mm oleva teräspuikko laukaistaan jousivoimalla puurakenteeseen. [52, s. 46] Puikon tunkeumasvyvyys korreloi materiaalitiheyden kanssa [29, s. 460]. Pilodynin koe soveltuu hyvin tarkempaa tutkimusta vaativien vaurioalueiden määrittämiseen, mutta koe yksinään ei anna tarkkaa tietoa puurakenteen tiheydestä [37, s. 279].





**Kuva 4.8** Pilodynin koe [6]

Puurakenteen halkeamasyvyyden mittaamiseen voidaan käyttää rakotulkkia. Rakotulkki on ohut ja jäykkä liuska, jonka paksuus on luokkaa 0,1 millimetriä. Sillä saadaan siten mitattua kapeidenkin halkeamien syvyyttä. [42, s. 22]



## 5. KATTORISTIKON VAHVISTUSMENETELMÄT

### 5.1 Näkökulmia kattoristikoiden vahvistamisesta

Kattoristikon vahvistamistarpeeseen voivat johtaa ristikon kuormien muuttuminen, jo alun perin alimitoitettut ristikon rakenneosat tai ristikon vaurioituminen kosteuden tai ylikuormituksen takia [56, s. 62]. Rakenteiden vahvistamisella voidaan pyrkiä joko niiden alkuperäisen kuormankantokyvyn palauttamiseen tai käyttöään jatkamiseen lisäämällä vahvistavia rakenneosia. Vahvistustavaksi voidaan lukea myös uusien kantavien rakenteiden lisääminen, jolloin vanha rakenne jää niin sanotusti museokäyttöön rakennukseen. Puurakenteiden vahvistusmenetelmät on suunniteltava aina tapauskohtaisesti, sillä vanhat, käsintehty puurakenteet ovat aina yksilöllisiä. [52, s. 52] Arvokohteita korjattaessa pyritään noudattamaan rakenteiden alkuperäisiä materiaaleja, muotoja ja työtapoja [1, s. 75].

Rakenteellisia vaurioita kärsineen ristikon vahvistustapaa suunniteltaessa tulee selvittää, mitkä ovat ristikon heikoimmat kohdat ja millaisia rasituksia kohdissa välittyy. Siten ristikon vahvistaminen osataan kohdentaa oikein. Ennen rakenteen vahvistamista sen vaurioitumisen aiheuttaja pitäisi selvittää, jotta tulevaisuudessa rakenteen vaurioituminen samasta syystä voidaan estää [24, s. 61].

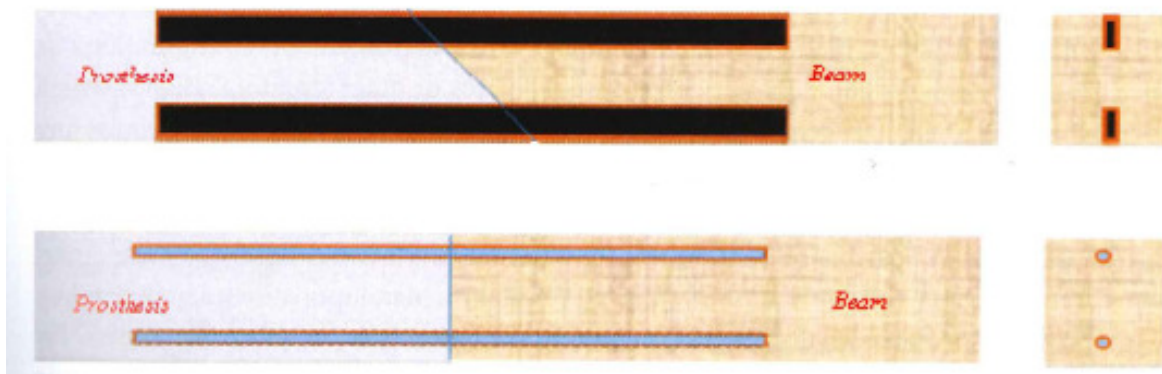
Kattoristikoita vahvistettaessa rakenteen jäykkyys lisääntyy. Rakenteen paikallisen jäykkyyden lisääntyminen on otettava huomioon rakennemallia tarkasteltaessa. Ristikon vahvistamisen vaikutus kuormien jakautumiseen ja rakenteen kokonaisstabiiliteettiin tulee arvioida. [13, s. 9]

Kattoristikoiden vahvistustoimenpiteet voivat kohdistua vaurioista riippuen joko yksittäisiin rakenneosiin, rakennekokonaisuuksiin, liitoksiin tai rakenteiden liittymiin [52, s. 52]. Vahvistustavan valintaan vaikuttavat muun muassa rakenteeseen kohdistuvan rasituksen tyyppi, vahvistettavan rakenteen ulkonäkövaatimukset ja se, sallitaanko rakenteeseen pysyviä vahvistusosia vai pitääkö rakenne olla palautettavissa alkuperäiseen muotoonsa. [13, s. 19] Yleensä rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuu, kuinka alkuperäisen näköisenä vahvistettava kattoristikko tulee säilyttää. Esimerkiksi kirkkoissa kattoristikot ovat yleensä kokonaan sisäpuolelta nähtävissä, mikä asettaa haasteita niiden korjaamiselle. [15] Lisäksi on otettava huomioon, kuinka helposti korjattava rakenne on saavutettavissa ja minkälaista ammattitaitoa rakenteen vahvistustavan toteutukseen on käytettävissä [13, s. 19].

## 5.2 Vaurioituneiden osien uusiminen

Vaurioituneita puurakenteita voidaan vahvistaa korvaamalla vaurioitunut osa uudella puurakenteella. Puurakenteet saattavat olla vain paikallisesti vaurioituneita, joten aina ei ole taloudellisesti kannattavaa uusida koko rakennetta. [13, s. 12] Puurakenteen vaurioituneen osan korvaaminen uudella puurakenteella on korjaustapa, jossa alkuperäistä rakennetta voidaan säästää mahdollisimman paljon. Korjaustavan suunnittelu perustuu siihen, että uuden ja vanhan rakenteen liitoksen kestävyys tulee olla vähintään vanhan puurakenteen vaurioitumattoman poikkileikkauksen kestävyyttä vastaava. [13, s. 14]

Vaurioitunut rakenne voidaan korvata uudella puuosalla, joka voi olla sahatavaraa tai tehdasvalmisteinen insinööripuutuote. Uuden rakenneosan kiinnittämiseen voidaan käyttää esimerkiksi puskuliitosta, joka on vahvistettu puutapeilla ja liimalla. Uusi rakenneosa voidaan kiinnittää myös esimerkiksi kuituvahvistetusta polymeeristä (FRP) tehtyjen tankojen tai levyjen avulla, jotka upotetaan rakenteeseen (kuva 5.1). Niiden etu teräkseen nähden on hyvä korroosionkestävyys, vaikka niiden hinta on korkea. Rakenteeseen upotettavien kiinnitysosien avulla alkuperäisen rakenteen ulkonäkö muuttuu mahdollisimman vähän ja samalla liitososat ovat palosuojattuja. [13, s. 12]

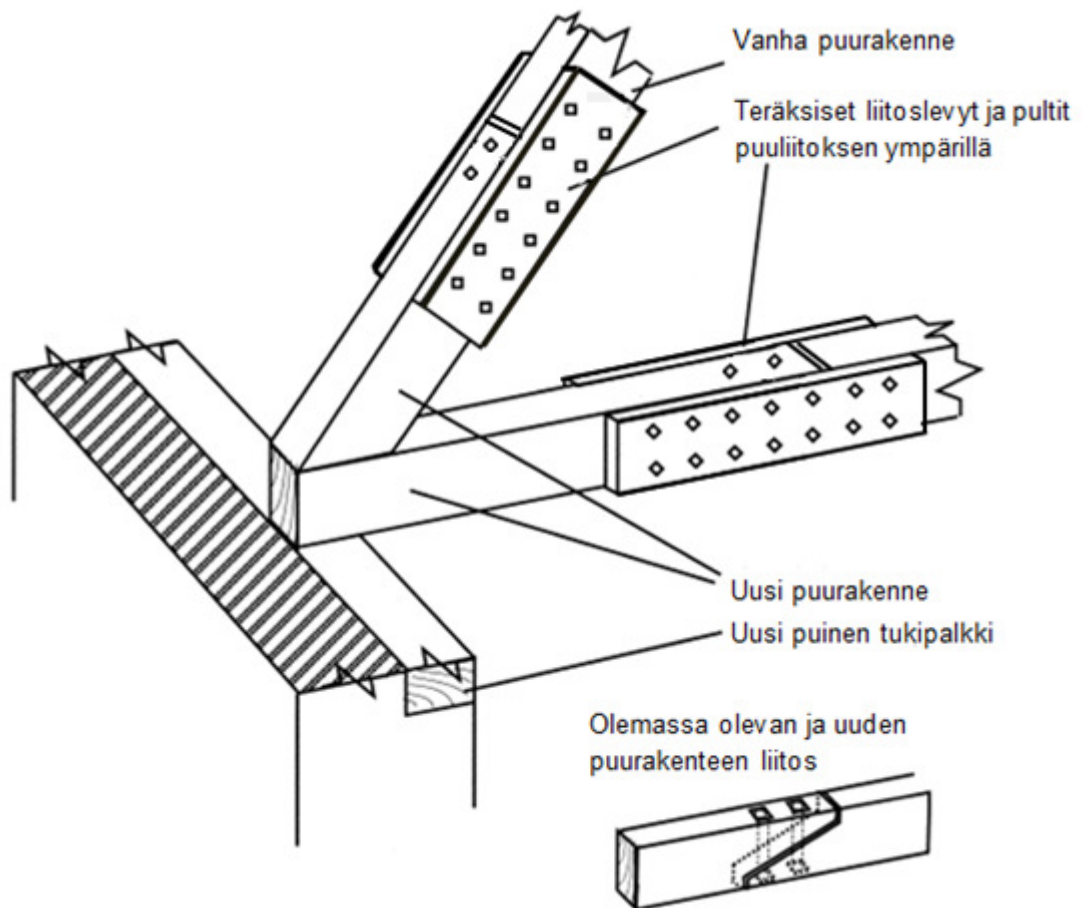


**Kuva 5.1** Uuden puurakenteen kiinnitys olemassa olevaan rakenteeseen [13, s. 13]

Puurakenteen vaurioituneiden osien korvaaminen uusilla puurakenteilla on melko työläs prosessi, sillä se sisältää useita eri työvaiheita. Vanha puurakenne tulee tukea ennen vaurioituneen osan irtisahaamista. Vanhaan ja uuteen rakenteeseen tehdään reiät tai kolot liitoksen vahvistusosia varten, joihin kiinnitysosat ankkuroidaan injektoimalla. Myös uusi puurakenne vaatii erillisen tuennan, jotta injektointiaine ehtii kovettua ennen rakenteen kuormittamista. [13, s. 12]

Vanhoissa rakennuksissa kosteaan tiilimuuriin tuetut puurakenteet ovat saattaneet kärsiä lahovaurioista. Kun esimerkiksi seinän sisään tuetun puuristikon tukialue on vaurioitunut niin pitkälle, ettei sen rakenteellinen kestävyys ole enää riittävä, voidaan se korvata uudella rakenneosalla kuvan 5.2 mukaisesti. Tällöin puurakenteen vaurioitunut osuus poistetaan ja sen tilalle kiinnitetään uusi puurakenne. Uusi puurakenne voidaan kiinnit-

tää vanhaan rakenteeseen esimerkiksi mekaanisesti puskuliitoksen ja läpipulttauksen avulla, minkä jälkeen liitoksen jäykkyys voidaan varmistaa liitoksen sivuille kiinnitettävien teräslevyjen avulla. Liitoslevyt tulee ulottaa riittävän pitkälle terveeseen puurakenteeseen, jotta voimien välittyminen liitoksessa voidaan varmistaa. [11, s. 169]



**Kuva 5.2** Ristikon vaurioituneen pään korvaaminen uudella puurakenteella [11, s. 170. Muokattu]

Uuden puurakenteen tulee vastata sekä mekaanisilta ominaisuuksiltaan että kosteuspiitoisuudeltaan vanhaa puurakennetta [13, s. 14] Liitettävien osien erilaiset kosteuspiitoisuudet johtavat niiden erilaiseen kosteuskäyttäytymiseen, mikä voi heikentää liitoksen toimintaa [15].

Liitoksessa käytettävän injektointiaineen tulisi soveltua sekä puurakenteelle että käytettäville vahvistusosille. Injektointiin voidaan käyttää esimerkiksi tikistrooppista epoksi-liimaa, jolla saavutetaan hyvä ankkurointilujuus. Lisäksi se on valumattomuutensa puolesta helposti työstettävää. [13, s. 14]

### 5.3 Ristikön lisävahvistukset

Olemassa olevaa puurakennetta voidaan vahvistaa sen sisään tai ulkopinnoille asennettavilla lisävahvistuksilla. Kun puurakennetta vahvistetaan eri materiaalia olevilla osilla, tulee niiden yhteensopivuus ottaa huomioon. Vahvistusosina voidaan käyttää erilaisia metalli-, lasikuitu- tai hiilikuitutankoja ja – levyjä. Edellä mainittujen vahvistusosien ja puun lämpö- ja kosteusmuodonmuutokset ovat erilaisia. Lisäksi tulee ottaa huomioon liitettävien osien erilaiset jäykkyydet. Mikäli vahvistusosana käytetään ruostuvaa terästä, tulee huomioida puun kosteuspitoisuuden vaikutus mahdolliseen teräskorroosioon. [52, s. 51–53] Kun puurakennetta vahvistetaan mekaanisilla kiinnikkeillä, tulee kiinnikkeet mitoittaa kestäämään koko vahvistettavaan rakenneseosaan kohdistuva rasitus. Tämä johtuu siitä, että mekaanisilla kiinnikkeillä tehtävät liitokset vaativat aina siirtymän ennen kuin voimat alkavat liitoksessa siirtyä. [39, s. 18]

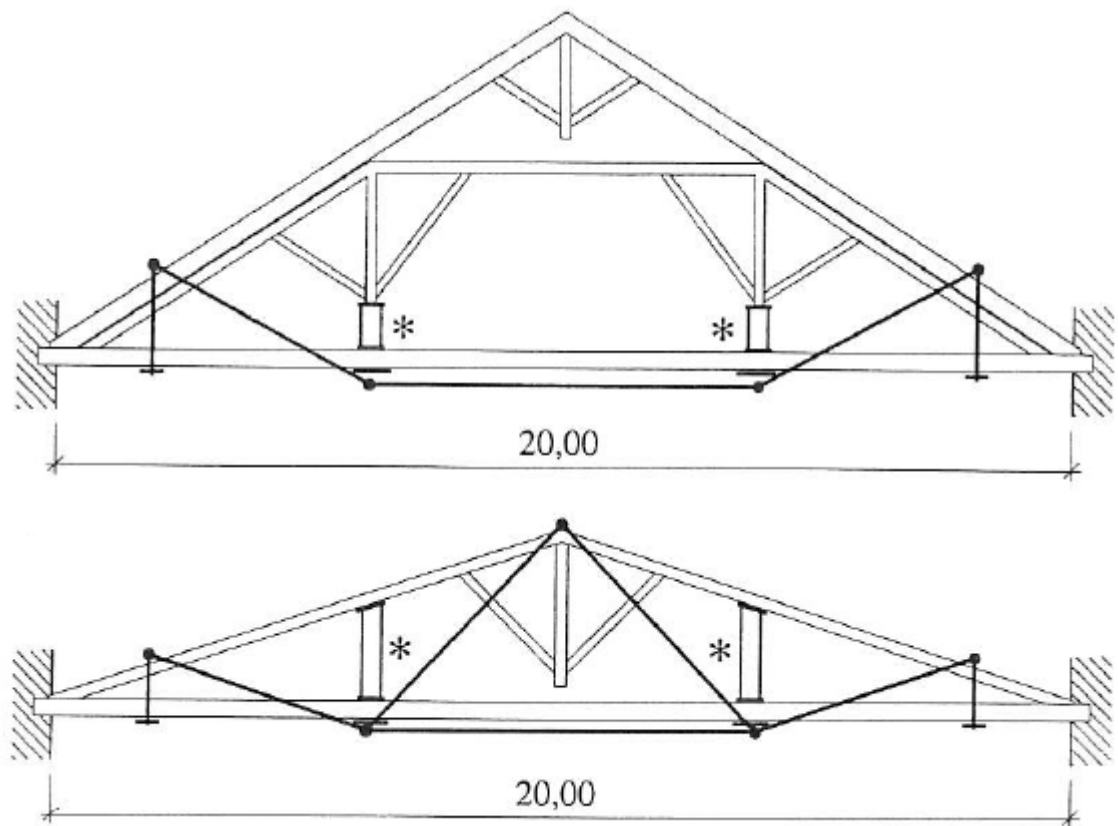
Puurakenteita voidaan vahvistaa esimerkiksi rakenteen sisään upotettavilla teräslevyillä, jotka voivat olla koko rakenneseosan korkuisia. Tällaiset teräsosat suunnitellaan ottamaan vastaan koko rakenneseosaan kohdistuvat kuormat. Teräslevyjen kiinnitystä varten tehdään urat, joiden sahaamiseen tarvitaan erikoistyökaluja. Teräslevyt kiinnitetään uriin liimaamalla. [52, s. 54]

Puurakenteiden vahvistamisella pyritään usein niiden taivutuskestävyyden parantamiseen, sillä se on yleensä niiden kestävyiden mitoittavin tekijä. Puurakenteiden taivutuskestävyyttä ja -jäykkyyttä voidaan lisätä erillisillä lisävahvikkeilla, jotka voivat olla mekaanisilla kiinnikkeillä ja liimoilla kiinnitettäviä tankoja tai levyjä. Tangot ja levyt voivat olla esimerkiksi metallisia, kuituvahvistetusta polymeeristä valmistettuja tai insinööripuutuotteita. Yleensä taivutettujen puurakenteiden murtotapa on hauras, joten lisäämällä vahvikkeita vetopuolelle saadaan puurakenteen taivutuskestävyyttä kasvatettua. Rakennusteknisesti vahvistustavan suunnittelussa on otettava huomioon, että puurakenteen taivutuslujuuden kasvaessa taivutetun rakenteen neutraaliakseli siirtyy lähemmäs rakenteen alareunaa, jolloin rakenteen puristusmurto saattaa tapahtua ennen vetomurtoa. [13, s. 14] Taivutuskestävyyden parantaminen vetopuolta vahvistamalla on yleensä sitä tehokkaampaa, mitä vaurioituneempi puurakenne on [52, s. 55].

Kattoristikoiden leikkausvoimat ovat yleensä suurimmillaan tukialueiden lähellä. Vanhoja kattoristikoita voi olla tarpeen vahvistaa leikkausvoimia vastaan, mikäli esimerkiksi ristikon tukialue on vaurioitunut. Puurakenteen leikkauskapasiteettia voidaan kasvatata esimerkiksi ruuveilla, rakenteeseen upotettavilla vahvistusosilla tai rakenteen sivuihin kiinnitettävillä teräslevyillä. [13, s. 18]

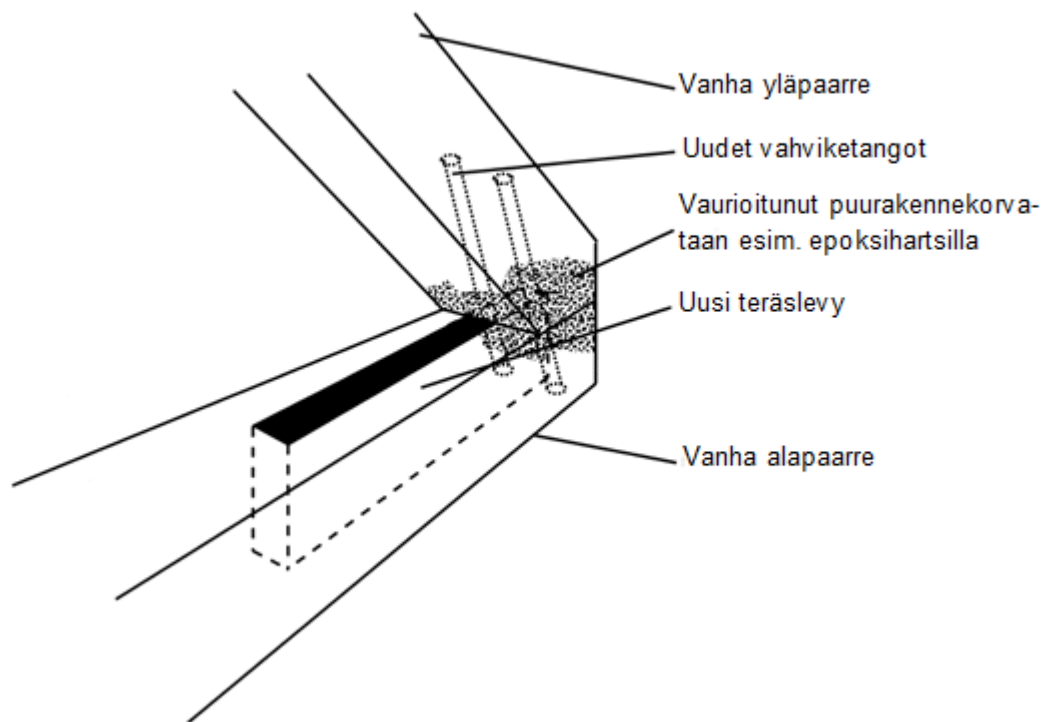
Puuristikoiden kantavuutta voidaan lisätä teräsvaijereiden avulla, jotka kiinnitetään rakenteeseen erillisillä liitososilla. Liitososat varustetaan kiristimillä, joiden avulla vaijeita voidaan kiristää esimerkiksi taipumien rajoittamiseksi. Myös puurakenteen koste-

usmuodonmuutokset saattavat edellyttää vaijereiden säätämistä. [52, s. 54] Kuvassa 5.3 on havainnollistettu ristikon teräsvaijerituentaa.



**Kuva 5.3** Ristikon vahvistaminen teräsvaijereilla [52, s. 56]

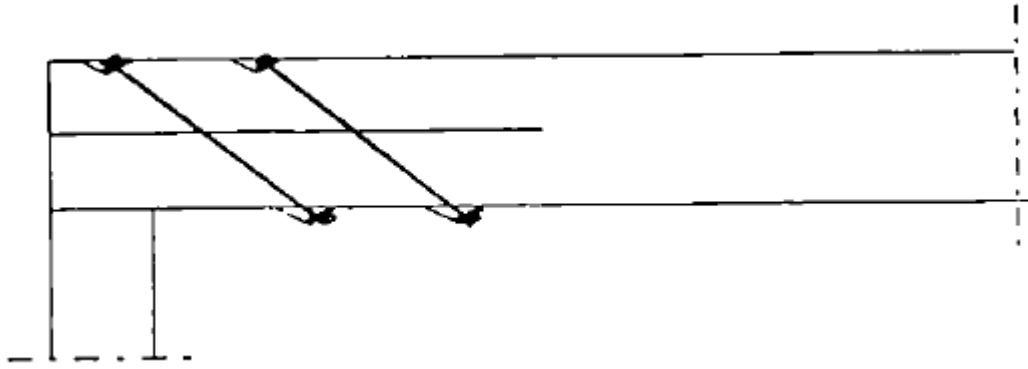
Melko uutena korjaustapana puurakennusosalalla on epoksihartsien käyttö. Niitä on käytetty jo pidemmän aikaa betonirakentamisessa, mutta puurakenteiden korjauksessa ne ovat tulleet esille vasta viimeisen 20 vuoden aikana. Epoksihartsien käytössä on tärkeää, että epoksin ja korjattavan puurakenteen välille saadaan muodostettua mahdollisimman luja liitos. [11, s. 172] Eräs tapa vahvistaa ristikon vaurioitunutta päätä on korvata vaurioitunut puu ristikon tukialueelta esimerkiksi epoksihartsilla ja lisätä liitokseen teräksisiä vahvistusosia. Tällainen vahvistustapa on esitetty kuvassa 5.4, jossa ristikon alapaarteeseen on asennettu teräslevy ja yläpaarteeseen liitos alapaarteeseen on vahvistettu terästangoilla. Kyseisessä korjaustavassa on varmistettava, että uudet teräsrakenteet ankkuroidaan riittävän pitkälle terveeseen puurakenteeseen. [11, s. 175]



**Kuva 5.4** Ristikön vaurioituneen pään korjaaminen [11, s. 176. Muokattu]

Ristikön heikkoja kohtia voidaan vahvistaa erilaisten puu- tai teräslevyjen avulla, mikäli puurakenteen lujuus ei ole merkittävästi heikentynyt. Teräslevyt kiinnitetään rakenteeseen läpipulttaamalla. Vahvistuslevyjen tulisi ulottua terveeseen puuhun vähintään 150 millimetrin matkalta. [11, s. 170] Myös vanerilevyjä voidaan käyttää puurakenteen vahvistamiseen. Yleensä vanerivahvistukseen tarvittavien nauhojen määrä on suuri, mutta vahvistustavan kestävyys on helppo laskennallisesti määrittää. [56, s. 63] Mikäli vanerilevyjen kiinnitykseen käytetään liimaa, tulee käytettävien kiinnikkeiden olla ruuveja. Näin ollen liitokseen saadaan aikaan liiman vaatima puristus. [39, s. 20]

Halkeillutta puurakennetta on tarpeen vahvistaa, mikäli halkeamat heikentävät puurakenteen kestävyyttä. Rakennetta voidaan vahvistaa esimerkiksi läpipulttauksella, jossa pultit sijoitetaan kuvan 5.5 mukaisesti vinosti puurakenteen poikkileikkaukseen nähden. Pulttivahvistus on helppo toteuttaa ja se on myös paloteknisesti hyvä ratkaisu, sillä puurakenne toimii pulttien palosuojauksena. [56, s. 63]



*Kuva 5.5 Halkeilleen palkin vahvistaminen [56, s. 63]*

Puurakenteisiin syntyviä kuivumiskutistumasta aiheutuvia halkeamia pidetään usein esteettisesti haitallisina, mutta halkeamia ei kuitenkaan ole suotavaa korjata, mikäli ne eivät merkittävästi heikennä puurakenteen kestävyyttä. Kuivumiskutistumasta johtuvat halkeamat elävät puun kosteusliikkeiden mukana. Mikäli tällaiset halkeamat korjataan jäykillä materiaaleilla, syntyy todennäköisesti muualle puurakenteeseen uusi halkeama. [52, s. 42]

## 5.4 Uudet kantavat rakenteet

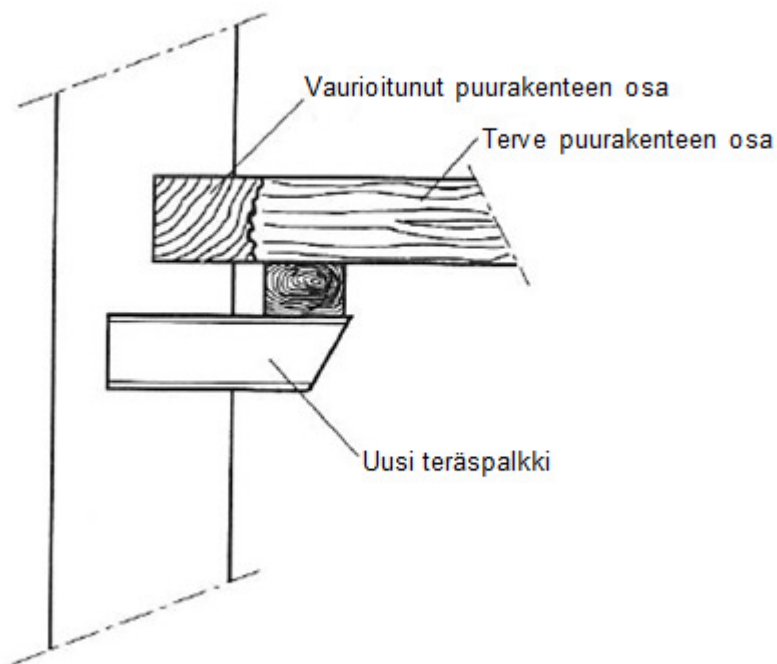
Mikäli vanhoilla kattoristikoiilla ei ole riittävää rakenteellista kestävyyttä jäljellä, eikä rakenteita haluta lähteä näkyvästi vahvistamaan, voidaan vanhojen kattoristikoiden kuormat viedä osittain tai kokonaan uudelle kantavalle rakenteelle. Tällöin vanhat ristikot voidaan säilyttää alkuperäisessä asussaan, ja rakennus säilyttää historiallisen arvonsa. Uusi kantava rakenne voi olla esimerkiksi vanhojen ristikoiden väleihin asennettavat uudet teräs- tai puuristikot, tai esimerkiksi kantavat teräs-, liimapuu- tai kertopuupalkit. Rakenteiden mitoitus toteutetaan nykystandardien mukaisesti. [1, s. 75–76]

Vanhojen rakenteiden korjauksessa on tärkeää, ettei rakenteen kulttuurihistoriallinen arvo vähene. Rakenteen korjausten yhteydessä sen alkuperäinen asu muuttuu jokaisella korjauskerralla. Vaurioitunutkin kattorakenne voidaan säilyttää sellaisenaan, jos sen kuormat viedään uudelle kantavalle rakenteelle. Tällöin vanhoja rakenteita ei tarvitse lähteä laaja-alaisesti korjaamaan ja ne voidaan jättää näkyville. Samalla vanha kattorakenne on tarvittaessa myös jälkikäteen palautettavissa. Esimerkiksi Pohjan kirkossa kattorakenteiden vahvistaminen toteutettiin olemassa olevien keskiaikaisten kattoristikoiden väliin sijoitetuilla uusilla kantavilla rakenteilla kuvan 5.6 mukaisesti. [1, s. 75]



**Kuva 5.6** Pohjan kirkon kattorakenteet [1, s. 75]

Aiemmin on luvussa 3.2 mainittu yhtenä yleisenä kattoristikoiden vaurioitumistapana niiden tukialueiden lahovauriot, kun puurakenne on tuettu suoraan kostean tiilimuurin varaan. Tällaisissa tapauksissa rakenteen tukireaktio voidaan siirtää uudelle tuelle, jolloin tukivoima voidaan siirtää terveeseen puurakenteen kautta. [52, s. 55] Kuvassa 5.7 on havainnollistettu uutta mahdollista tukirakennetta.



**Kuva 5.7** Kuormien siirtäminen vaurioituneelta tuelta uudelle tukirakenteelle [52, s. 56. Muokattu]

Tiiliseinään voidaan ankkuroida erillinen tuki, johon rakenne tuetaan esimerkiksi kuvan 5.7 mukaisesti. Uusi tukirakenne voi olla esimerkiksi teräspalkki. [52, s. 55]



## 6. ARVOKOhteiden Korjaustyöt

### 6.1 Korjausrakentamisen säädökset

Korjausrakentamisessa sallitaan yleisesti lievemmat säädökset kuin uudisrakentamisessa. Rakennusten korjaus- ja muutostöissä toimenpiteiden laatu ja laajuus sekä rakennuksen tai sen osan mahdollinen käyttötarkoituksen muutos ovat tavallisesti vaikuttaneet rakentamismääräyskokoelman määräyksien soveltamiseen. [59] Maankäyttö- ja rakennuslain mukaan rakennuksen korjaus- ja muutostöissä tulee huolehtia, että historiallisesti ja rakennustaiteellisesti arvokkaita rakennuksia ei turmella. Vanhan rakennuksen korjaamisessa tulee huomioida rakennuksen ominaisuudet ja erityispiirteet sekä soveltuvuus aiottuun käyttöön. [9]

Perinteisesti rakentamismääräyskokoelman määräykset ovat koskeneet uudisrakentamista. Rakentamismääräyskokoelman osia ollaan kuitenkin uudistamassa, ja jatkossa kussakin uudessa asetuksessa on osoitettu, koskeeko se uudisrakentamista vai korjaus- ja muutusrakentamista. Uudistukset pyritään saamaan valmiiksi vuoteen 2018 mennessä vuonna 2013 voimaan tulleen maankäyttö- ja rakennuslain muutoksen mukaisesti. [59]

### 6.2 Arvorakennusten vaaliminen

Vanhojen puurakenteiden korjaamisessa ja vahvistamisessa on usein kyse historiallisesti tai kulttuurisesti arvokkaan rakenteen säilyttämisestä ja sen arvon vaalimisesta. Monissa tapauksissa rakenteen uusiminen olisi taloudellisesti kannattavampaa kuin sen korjaaminen, mutta vanhoissa rakennuksissa painoarvo on kuitenkin rakenteen säilyttämisessä mahdollisimman alkuperäisessä asussaan. [52, s. 50]

Korjauskohteet ovat aina yksilöllisiä ja niihin soveltuvia korjaustapoja on suunniteltava alan asiantuntijaryhmän avulla. Korjauskohteissa tähän ryhmään kuuluvat suunnittelijoiden, tilaajan ja viranomaisten lisäksi myös erilaiset selvitystyöntekijät, jotka tekevät esimerkiksi rakennusten terveellisyyteen liittyviä selvityksiä. Korjausrakentamisessa noudatettavat lait ja määräykset asettavat reunaehdoja suunnittelulle. Näitä ovat esimerkiksi maankäyttö- ja rakennuslaki sekä erilaiset suojelulliset lait ja säädökset. [55, s. 74–75]

#### 6.2.1 Suojelunäkökulma

Rakennuksen suojelupäätökseen vaikuttavat sen säilyneisyys ja alkuperäisyys. Rakennus voidaan suojella, jos siinä on säilynyt sen rakentamisaikakaudelle tyypillisiä piirtei-

tä. Rakennus voi olla arvokas myös jonkin historiallisen tapahtuman seurauksena. [9] Suomessa arvorakennukset ovat yleensä kaavalla tai rakennusperintölailla suojeltuja. Asemakaava-alueella suojeltavat rakennukset määrätään maankäyttö- ja rakennuslain mukaan kaavamääräyksillä. Rakennusperintölailla suojellaan yleensä rakennuksia, jotka eivät ole asemakaavoitetulla alueella. Rakennusperintölailla voidaan myös erikseen suojella rakennuksen sisätiloja, joiden säilymistä ei voida asemakaavoituksella varmistaa. [60]

Rakennuksen suojelua voi esittää rakennuksen omistaja, kunta, maakuntaliitto, valtion viranomainen tai samalla paikkakunnalla toimiva yhteisö, jonka toimintaan liittyy kulttuuriperinnön vaaliminen. Suojelupäätöksessä arvioitavia asioita ovat muun muassa rakennuksen ikä, sen käyttöhistoria ja siihen liittyvät tapahtumat, rakennuksen säilyneisyys ja sen kulttuurihistoriallinen arvo. Museovirasto valmistelee lausunnon rakennuksen kulttuurihistoriallisesta merkityksestä elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselle (ELY-keskus), jonka tehtävä on hylätä tai hyväksyä kohteen suojeluesitys. Lopullisen vahvistuksen rakennuksen suojelemisesta tekee ympäristöministeriö. [60]

Valtion omistamia rakennuksia on aiemmin suojeltu vuonna 1985 säädetyn erityisen asetuksen perusteella, mikä on kuitenkin kumoutunut vuonna 2010. Näiden rakennusten suojelupäätökset ovat edelleenkin voimassa, vaikka rakennukset eivät olisi enää valtion omistuksessa. Nykyään valtion omistamien rakennusten suojelusta päätetään yleisen rakennusperintölain nojalla. [30]

Suomessa kirkollisia rakennuksia suojellaan erillisten lakien avulla. Kirkkolain mukaan kaikki ennen vuotta 1917 rakennetut evankelis-luterilaiset kirkolliset rakennukset ovat automaattisesti suojeltuja ja myös uudempia kirkkoja voidaan suojella. Laki ortodoksisesta kirkosta määrää kaikki ennen vuotta 1917 rakennetut ortodoksiset kirkot suojelunalaisiksi, mutta myös uudempia kirkkoja ja rukoushuoneita voidaan määrätä suojeltaviksi. [30]

Suojeltu rakennus tulee säilyttää suojelun edellyttämässä kunnossa, ja suojeltuun rakennukseen tehtävät muutokset ja korjaukset eivät saa vaarantaa kohteen kulttuurihistoriallista arvoa. Suojeltuihin rakennuksiin tehtäviä suurempia muutos- ja korjaustoimenpiteitä varten tulee yleensä pyytää museoviranomaisen lausunto. [30]

## 6.2.2 Museovirasto

Museovirasto on opetusministeriön alainen asiantuntijavirasto. Museoviraston yhtenä tehtävänä on huolehtia kulttuurihistoriallisesti arvokkaiden rakennusten säilymisestä valvomalla rakennuksiin liittyvää suunnittelua ja kehittämistä. Museoviraston toimintaa ohjaavat muun muassa laki rakennusperinnön suojelemisesta, maankäyttö- ja rakennuslaki, kirkkolaki, museolaki ja muinaismuistolaki. Museovirasto antaa lausuntoja suoje-

lukohteiden käytöstä, kehittämisestä ja suojelusta niitä tarvitseville tahoille, muun muassa suunnittelijoille. [30]

Suojelukohteisiin liittyvässä korjaussuunnittelussa on tärkeää, että museovirastoon ollaan yhteydessä jo suunnittelun aikaisessa vaiheessa. Tällöin saadaan selville suojelun edellyttämät reunaehdot. Museoviraston kanta suunniteltuihin korjaustöihin selviää museoviraston lausunnossa, joka voidaan antaa esimerkiksi korjauskohteen suunnittelu- tai rakennuslupa-asiakirjojen perusteella. Museovirasto suorittaa tarkastuskäyntejä suojelluissa korjauskohteissa, mutta vastuu suojelun toteutumisesta on suojellun rakennuksen omistajalla. [30]

### 6.2.3 Rakennushistoriaselvitys

Rakennushistoriaselvitys eli RHS tehdään kulttuurihistoriallisesti merkittäviin kohteisiin, joihin on suunnitteilla korjaus- tai muutostöitä. Rakennushistoriaselvityksen tarkoituksena on antaa tietoa rakennuksen historiasta, suunnittelu- ja muutosvaiheista sekä nykytilasta. Selvityksen perusteella museoviranomainen asettaa kohteen suojelutavoitteet, jotka perustuvat rakennuksen kulttuurihistorialliseen, rakennustaiteelliseen ja rakennustekniseen arvoon. Selvityksen yhtenä päätarkoituksena on tuoda esille ne ominaisuudet, jotka rakennuksessa halutaan säilyttää. Rakennushistoriallista selvitystä käytetään pohjana suojelukohteen korjaussuunnittelulle. [55, s. 77–78] Selvitystä voidaan käyttää myös yksityiskohtaisen kaavoituksen suunnittelussa [46, s. 9].

Rakennushistoriallista selvitystä tehdään arkistotutkimuksen, dokumentoinnin ja inventoinnin avulla. Arkistolähteistä etsitään tietoa kohteen rakennus- ja muutoshistoriasta. Erilaisia arkistolähteitä tutkimalla ja vertaamalla voidaan arvioida rakennuksen eri aikoina tehtyjen osien säilyneisyyttä ja kohteeseen tehtyjen suunnitelmien toteutuneisuutta. Inventoinnissa pyritään täydentämään arkistolähteistä saatuja tietoja kohteella tehtävien tutkimusten avulla. Kohteella tehtävien kenttätutkimusten avulla rakennuksen nykytilanne saadaan dokumentoitua. Usein nykytilanteen analysointiin tarvitaan pohjaksi arkistotietoja. [46, s. 9, 13, 27]

Selvityksessä otetaan huomioon rakennuksen mahdolliset käyttämättömät ajanjaksot sekä tilojen käyttötarkoitus. Rakennuksen käyttöhistorian selvittäminen on tärkeässä roolissa, sillä sen perusteella osataan rakennukseen kohdentaa tarkempia tutkimuksia, kuten esimerkiksi haitta-ainetutkimuksia. Rakennushistoriaselvityksen yhteydessä ei kuitenkaan määritetä rakenteen nykykuntoa, vaan se tehdään erillisten kuntotutkimusten perusteella. [55, s. 77–78]

## 7. CASE-ESIMERKIT

### 7.1 Savitaipaleen kirkko

Savitaipaleen kirkko on vuonna 1924 valmistunut kirkkorakennus Savitaipaleella. Kirkko on verhoiltu rapakivigraniitilla ja sen on suunnitellut arkkitehti Josef Stenbäck. Rakennus edustaa tyyliltään kansallisromantiikkaa. Kirkko rakennettiin vuonna 1918 vapaussodan aikana tulipalossa tuhoutuneen puukirkon tilalle. [47] Kuvassa 7.1 on Savitaipaleen kirkon julkisivukuva.



**Kuva 7.1** Savitaipaleen kirkon graniitilla verhoiltu kaakkoisjulkisivu [18]

Kirkossa ovat puiset kattokannattajat. Kirkkosalin katto on tehty holvaamalla, joten puiset kattorakenteet ovat sisäkatosta erillään olevia rakenteita. Puiset kattorakenteet ovat olleet graniittiverhoiltujen, tiilimuurattujen ulkoseinien varaan tuettuja. Puurakenteita oli osittain tuettu myös kirkon muurattujen päätykolmioiden sisään. [18]

Kirkossa havaittiin puisissa kattorakenteissa kosteus- ja lahovaurioita, erityisesti vesikatton jiirien alueella sekä ulkoseinäliittymissä. Vesikatton konesaumattun peltikatteen ylösnostoja ei ollut tiivistetty riittävästi luonnonkivimuuria vasten, mikä oli aiheuttanut veden kulkeutumisen rakenteeseen. [18]



**Kuva 7.2** *Kirkon lahonnut kattokannattaja [18]*

Korjaustöiden yhteydessä lahonneita ja heikkokuntoisia puurakenteita uusittiin vanhan mallin mukaisesti. Puurakenteet olivat vain paikallisesti vaurioituneita, joten kantavia kattorakenteita vahvistettiin korvaamalla puurakenteiden vaurioituneet osat. [18] Kuvassa 7.3 on havainnollistettu korvaavien puuosien kiinnitystapaa vanhaan rakenteeseen.



**Kuva 7.3** *Uusi puurakenne on kiinnitetty vanhaan rakenteeseen läpipulttauksella [18]*

Korjaustöissä noudatettiin alkuperäistä rakennustapaa. Puurakenteiden kosteusrasitusta vähennettiin irrottamalla uusitut puurakenteet muurista bitumikermikaistalla. [18]



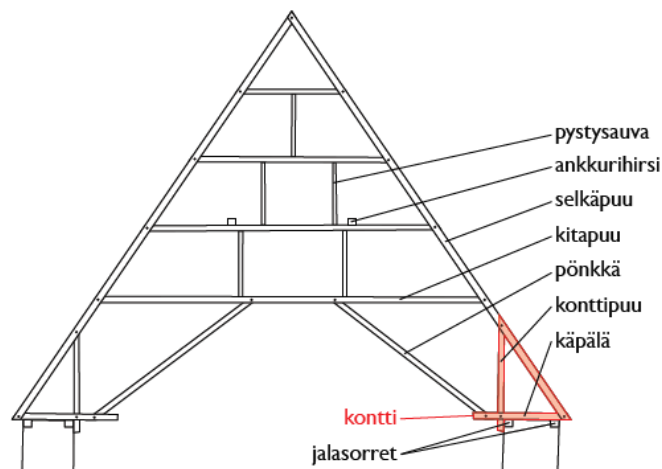
## 7.2 Sipoon vanha kirkko

Sipoon vanha kirkko on rakennettu vuosina 1450–1454. Kirkko on keskiaikainen harmaakivikirkko (kuva 7.4). Sen suunnittelijaa ei tunneta. Kirkkoa kutsutaan myös Pyhän Sigfridin kirkoksi, sillä se on omistettu kyseiselle henkilölle. [50]



**Kuva 7.4** Sipoon vanha kirkko [57]

Sipoon vanhassa kirkossa kattokannattajina ovat keskiaikaiset, puurakenteiset, kuvan 7.5 mukaiset konttikattotuolit. Kattotuoleissa on käytetty eri sauvojen välisissä liitoksissa puutappeja. [1, s. 12–13] Aiempien korjausten yhteydessä konttikattotuolien liitoksiin on lisätty rautanauloja. Lisäksi konttikattotuoleihin on tehty laputuksia, eli olemassa olevaa rakennetta on vahvistettu sen kylkiin asennetuilla puuvahvistuksilla. [1, s. 65]



**Kuva 7.5** Sipoon vanhan kirkon konttikattotuolin rakenne [1, s. 11]

Kirkon kattorakenteissa oli havaittavissa muurin kallistumisen aiheuttamia muodonmuutoksia. Konttikattotuolien liitoksissa havaittiin yleisesti siirtymiä ja kiertymiä. Konttikattotuolien alimmat kitapuut ovat muurien kallistumisen takia jääneet liian lyhyiksi, jolloin kitapuiden ja selkäpuiden liitoksissa havaittiin yleisesti rakoa (kuva 7.6). Muurien kallistuessa osa kitapuiden ja selkäpuiden välisten liitosten puutapeista oli murtunut. [1, s. 64] Lisäksi erityisesti vesikaton jirien alueella sekä päätymuureissa kiinni olevissa puurakenteissa oli havaittavissa lahovaurioita. Aikaisempien korjausten yhteydessä kattorakenteiden liitoksiin oli lisätty naulauksia, joista osa oli korroosion vuoksi merkittävästi vaurioitunut. [1, s. 67–68]



**Kuva 7.6** Kitapuun ja selkäpuun välille on syntynyt rakoa kirkon seinämuurien kallistumisen takia [1, s. 87]

Konttikattotuolien korjauksessa pyrittiin palauttamaan liitosten kontakti. Liitosten siirtymiä korjattiin kiilapaloilla. [1, s. 82, 84] Lisäksi korvattiin osa merkittävimmin lahovaurioituneista puurakenteista uusilla puuosilla. Lahonneet rakenneosat uusittiin vanhan rakennustavan mukaisesti. Esimerkiksi lahonneen jalasorren lahovaurioitunut pää poistettiin ja uusi rakenne liitettiin vanhaan alkuperäistä vastaavan, puutapeilla vahvistetun hammaslapaliitoksen avulla [1, s. 91]. Korjaustyössä käytettiin myös kuvan 7.7 mukaisista laputustekniikasta, eli vanhoja rakenneosia vahvistettiin niiden kylkiin asennettujen puurakenteiden avulla. Tällöin ero alkuperäisen ja uuden rakenteen välillä on selkeä, eikä alkuperäisiä osia tarvitse erikseen muotoilla osien yhteensovittamiseksi. [1, s. 76]



**Kuva 7.7** Kitapuun ja selkäpuun liitokseen syntyneen raon tiivistys kiilapalalla ja liitoksen vahvistus laputtamalla [1, s. 63]

Mielenkiintoista tässä korjausprojektissa oli muun muassa se, että korjausta varten teetettiin erityinen työstöväline. Uusien puutappien asentamista varten teetettiin erityinen poranterä, jossa on kapeneva kärki (kuva 7.8). Tällöin puutappiliitoksesta saadaan luja, kun puutappi kiilautuu kärjestään puurakenteeseen. [2, s. 13]



**Kuva 7.8** Kärjestään kapeneva poranterä

Korjaustöissä käytettiin erästä hieman harvinaisempaa liitostapaa, kuvan 7.9 mukaista rusettiliitosta. Rusettiliitoksen avulla saadaan luja liitos liitettävien puukappaleiden välille. [2, s. 32]



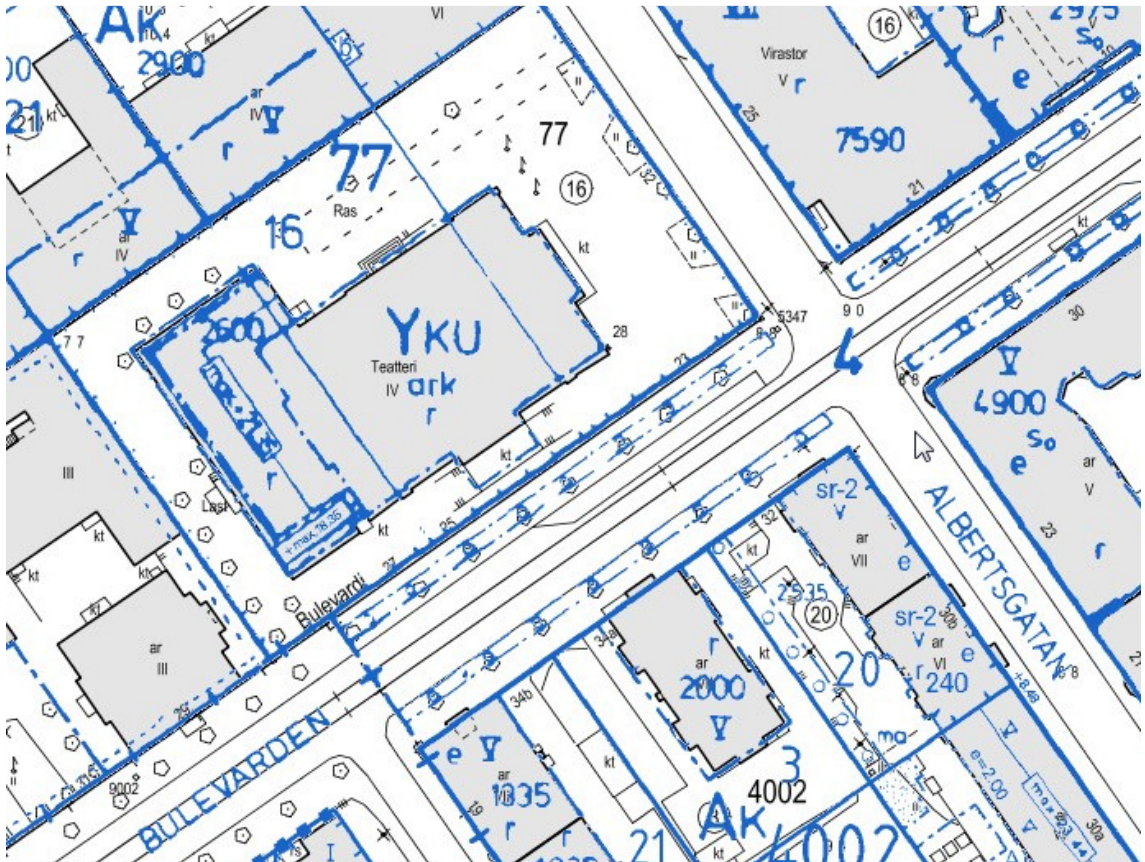
**Kuva 7.9** Rusettiliitos [41]

Korjaustyön yhtenä tavoitteena oli säilyttää katon alkuperäinen toimintaperiaate käyttämällä alkuperäistä rakennustapaa noudattavaa korjaustapaa. Korjauksessa ei haluttu käyttää metalliosia, jotta myös korjattu rakenne olisi joustava, puutappiliitoksilla toteutettu rakenne. Lisäksi yksi syy metalliosien poisjättämiseen oli palotekninen suunnittelu. [1, s. 74]



## 8. CASE: ALEKSANTERIN TEATTERIN KATTO- RISTIKOIDEN VAHVISTAMINEN

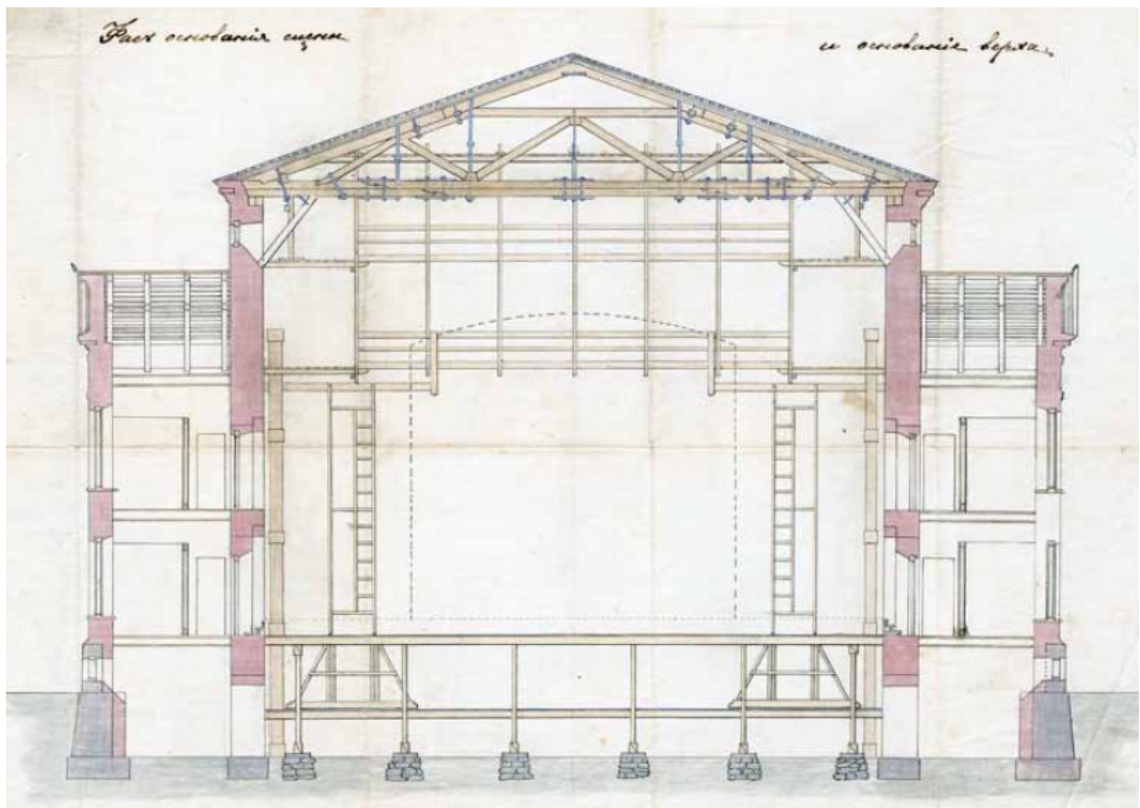
Aleksanterin teatteri on vuonna 1879 valmistunut kulttuurirakennus Helsingissä Bulevardin ja Albertinkadun risteyksessä. Se on alun perin rakennettu Helsingin venäläiseksi teatteriksi, jonka tarkoituksena oli tarjota viihdykettä Suomessa oleville venäläisille sotilaille ja virkamiehille sekä tuoda venäläistä kulttuuria Suomeen. [27, s. 8] Rakennus edustaa tyyliltään uusrenessanssia [30] tai pietarilaissävytteistä uusempireä [27, s. 70]. Aleksanterin teatterin vanhin osa, jossa teatterin näyttämö ja katsomo sijaitsevat, on suojeltu valtion omistamien rakennusten suojelusta annetun asetuksen 480/85 nojalla vuonna 1980. Nykyään rakennus on suojeltu asemakaavassa merkinnällä ”ark”, joka velvoittaa suojelemaan rakennuksen julkisivujen ja vesikaton rakennustaiteellista ja kulttuurihistoriallista arvoa ja tyyliä. Mahdolliset korjaus- ja muutostyöt on toteutettava rakennuksen tyyliin soveltuvalla tavalla. [27, s. 67] Kuvassa 8.1 on osakopio Helsingin voimassa olevasta asemakaavasta.



*Kuva 8.1 Osakopio Helsingin asemakaavasta [14]*

## 8.1 Rakennuksen historia

Aleksanterin teatteria alettiin rakentaa Suomen kenraalikuvernööriin, kenraaliadjutantti kreivi Nikolai Adlerbergin toimesta. Teatterirakennuksen käytännön suunnittelutyön hoiti Viaporin insinöörihallinnon päällikkö, insinöörieversti Pjotr Benard. Rakennustöitä valvoi pääasiassa Suomen insinööripiirin sotilasrakennusten haltija, everstiluutnantti Pjotr Kašperov. Teatterin rakennustyöt kestivät yhteensä kolme vuotta. [27, s. 8- 21] Teatterin rakenne on aikakaudelleen tyypillinen, mutta sen rakentamisessa käytettiin erityisen paljon kierrätysmateriaaleja. Teatterin tiilimuureissa ja kivijalassa on käytetty Ahvenanmaalta puretusta Bomarsundin linnoituksesta tuotuja materiaaleja. [27, s. 80] Kuvassa 8.2 on esitetty päiväämätön teatterin leikkauspiirustus.



**Kuva 8.2** Vanha teatterin leikkauspiirustus näyttämön kohdalta [27, s. 81]

Aleksanterin teatteria laajennettiin ensimmäisen kerran vuonna 1909, jolloin teatterin länsipäätyyn rakennettiin uusi lavastemakasiini [27, s. 28]. Vuonna 1918 rakennus siirtyi Suomalaisen Oopperan käyttöön, kun se oli virallisesti luovutettu Suomen valtion omistukseen Venäjän vallan päätyttyä. Rakennuksen käyttötarkoituksen muutoksen myötä katsomon ja muiden yleisötilojen kapasiteettia kasvatettiin ja orkesterisyvennystä laajennettiin. [27, s. 32, 34] 1920-luvulla teatterin länsipäädyn lavastemakasiinia laajennettiin, mutta laajennusosa purettiin myöhemmin 1950-luvulla rakennetun lisärakennuksen myötä [27, s. 38, 49]. 1950-luvulla oopperan toiminnan jatkumista uhkasi vakavat puutteet paloturvallisuudessa, minkä vuoksi rakennukselle tehtiin laajoja muutos- ja korjaustöitä. Vuonna 1953 katsomon puinen välipohja muutettiin betonirakenteiseksi ja



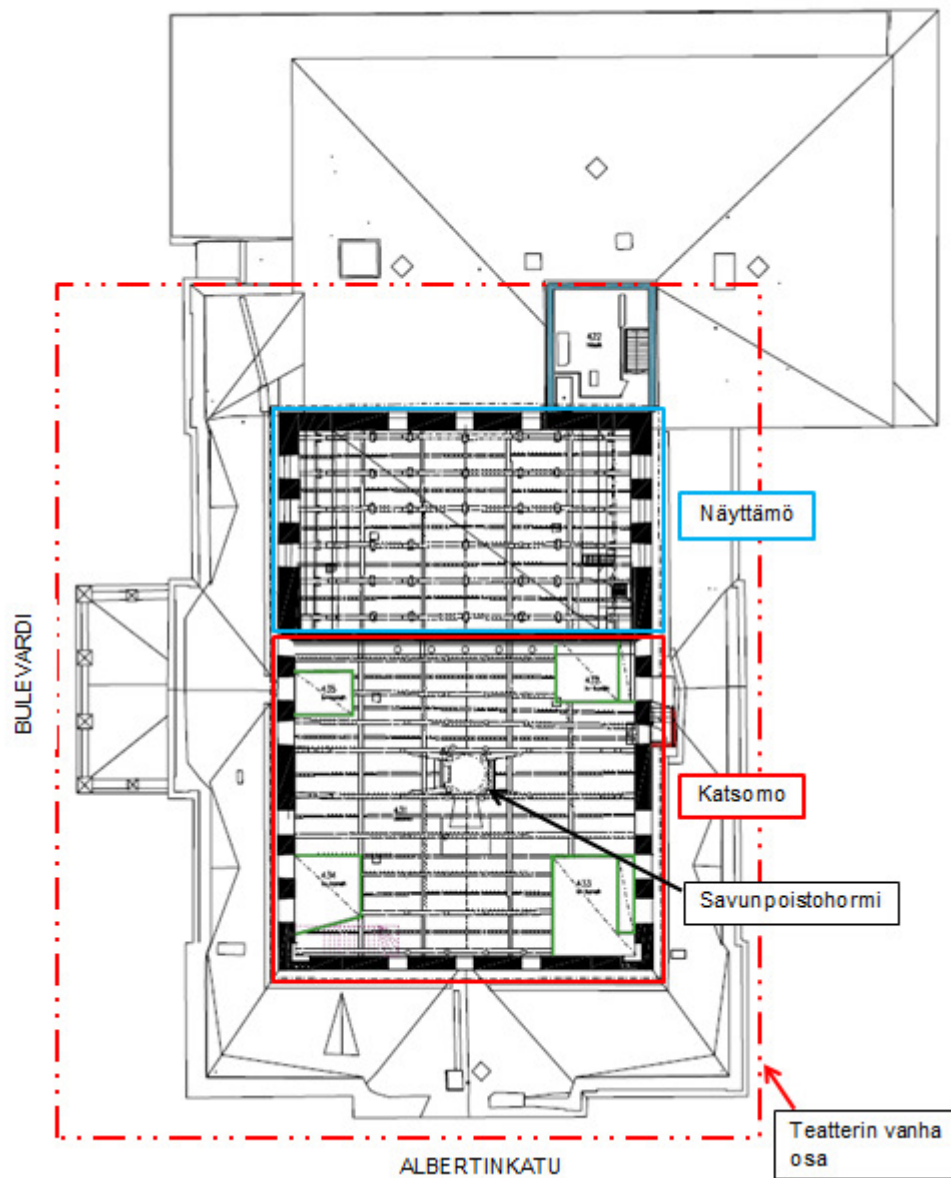
vuosina 1954–1955 teatteriin rakennettiin uusi lisärakennus tilanahtauden helpottamiseksi. [27, s. 46] Laajennusosan valmistumisen jälkeen rakennuksen toiminta siirtyi Suomen Kansallisoopperalle [27, s. 49]. Aleksanterin teatterissa tehtiin vuosina 1979–1980 laajempi peruskorjaus, jolloin muun muassa uusittiin teatterin tekniikkaa ja rakennuksen ilmanvaihtolaitteet [27, s. 52–53]. Vuonna 1993 rakennus palautui Aleksanterin teatteriksi, kun Kansallisooppera siirtyi nykyisille tiloilleen Helsingin Töölöön. Aleksanterin teatteri siirtyi Senaatti-kiinteistöjen omistukseen vuonna 2005. Nykyisin rakennus toimii vierailuteatterina. [27, s. 56–57] Kuvassa 8.3 on Aleksanterin teatteri nykyisessä ulkoasussaan.



*Kuva 8.3 Aleksanterin teatteri [18]*

## 8.2 Kantavat kattorakenteet

Teatterirakennuksen vanhimmassa, vuonna 1879 valmistuneessa osassa ovat säilyneet alkuperäiset, puiset kattoristikot [27, s. 80]. Ristikoiden ikä on lähes 140 vuotta. Ristikot ovat massiivisia, männystä rakennettuja puukannattajia. Teatterin vanhan osan ullakko-tila on jaettu tiilipalomuurilla kahteen tilaan, joista toinen on näyttämön päällä sijaitseva köysiullakko ja toinen tiloista on rajoittunut katsomon yläpuoliseen osaan. Näyttämön yläpuolella on yhteensä kuusi kattoristikkoa ja katsomon yläpuolella ristikoiden määrä on yhdeksän. Kuvassa 8.4 on ullakon tasopiirustus.



**Kuva 8.4** Ullakon kantavat rakenteet [27, s. 63. Muokattu]

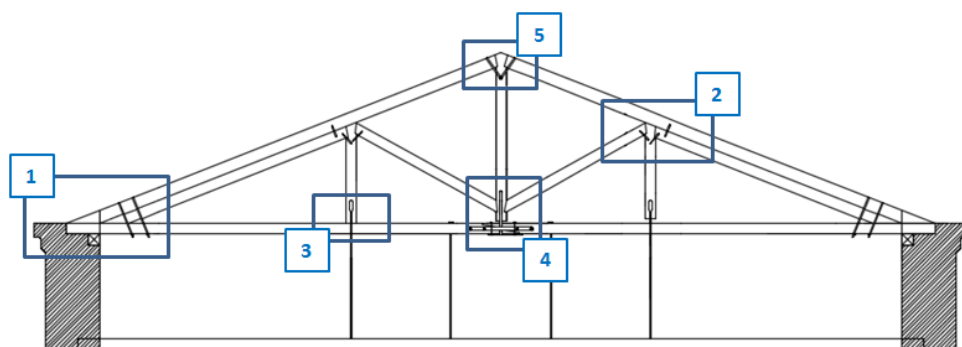
Ristikot ovat jänneväliltään lähes 19 metriä ja kuormitusleveydeltään noin kaksi metriä. Niiden väleissä ovat katon lappeen suuntaiset katto-orret, jotka siirtävät kuormia ristikoiden yläpuoleisiin tuettujen sekundääripalkkien kautta. Ristikot on tuettu

kantavien tiilimuurien varaan. Teatterin kattoristikoida kuormittavat normaalit lumi-, tuuli- ja vesikaton hyötykuorma. Näiden lisäksi katsomon yläpuolisia ristikoita kuormittaa ullakon lattiarakenteiden paino, sillä yläpohjapalkit on osittain kannatettu ristikoiden alapaarteista vetotankojen avulla. Myös katsomon ullakolle asennetut ilmanvaihtokoneet kuormittavat ristikoita. Katsomon ullakon läpi kulkee massiivinen savunpoistohormi, joka on liitetty aikoinaan teatterisalia lämmittäneeseen, kaasulla toimineeseen kattokruunuun. Hormin viereiset ristikot on sidottu rautapannoilla hormiin kiinni, joten myös hormi aiheuttaa ristikoihin lisäkuormituksia. Näyttämön ullakolla ristikoita taas rasittavat normaalien kuormitusten lisäksi rissapyöristä aiheutuva kuormitus sekä näyttämötekniikan ripustuskuormat. [18]

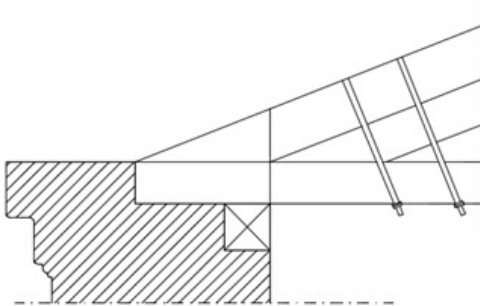
### 8.2.1 Katsomon kattoristikot

Aleksanterin teatterin ullakolla on pääpiirteittäin kahden tyyppisiä ristikoita. Katsomon ullakolla olevat kattoristikot ovat yleisesti sauvamäärältään pienempiä kuin näyttämön yläpuoliset ristikot, joissa on suurempien kuormitusten vuoksi tavoiteltu suurempaa kapasiteettia kuin katsomon kattoristikoissa. Katsomon ullakolla on lisäksi savunpoistohormin kummallakin puolella rakennemalliltaan näyttämön kattoristikoita vastaavat ristikot, joita käsitellään myöhemmin kappaleessa 8.2.2. [18]

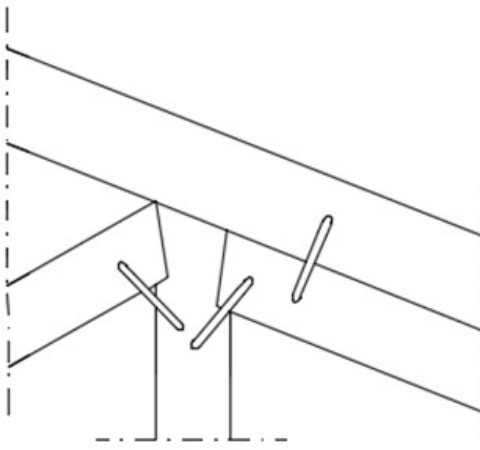
Katsomon yläpuolisten ristikoiden yleinen rakennemalli on esitetty kuvassa 8.5, johon on numeroitu ristikon erilaiset liitostyypit. Liitosten piirrosmallit ja valokuvat esitetään myöhemmin kuvissa 8.6–8.10. Ristikoiden alapaarteista on vetotankojen avulla kannatettu ullakon lattiapalkkeja. [18] Liitoksista otetuissa valokuvissa on näkyvissä yleisesti ristikoiden rautaisiin liitososiin tehtyjä palosuojausja.



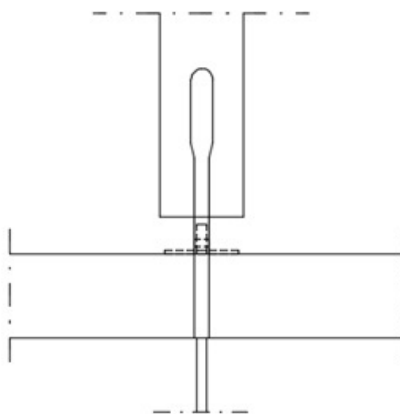
**Kuva 8.5** Katsomon yläpuolinen kattoristikko



**Kuva 8.6** Liitos numero 1: ristikon liitos tuella

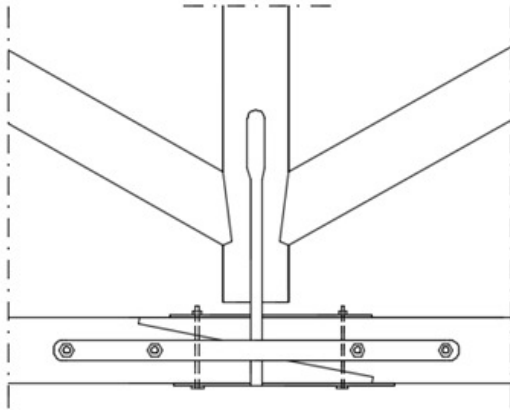


**Kuva 8.7** Liitos numero 2: ristikon diagonaali- ja vertikaalisauvojen välinen liitos

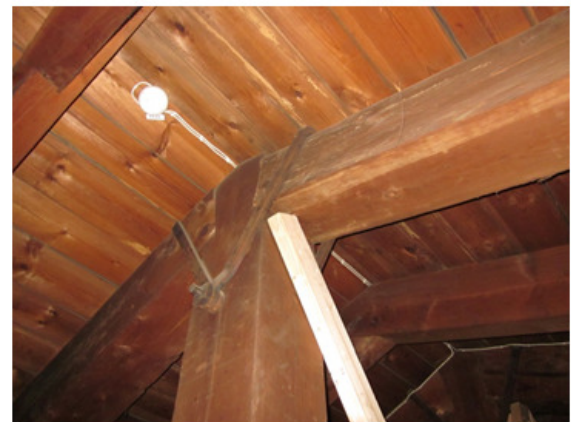
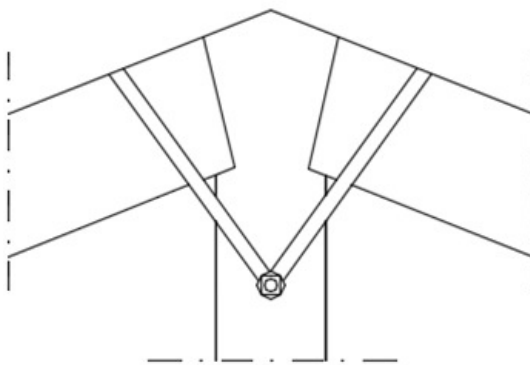


**Kuva 8.8** Liitos numero 3: vertikaalisauvan (riippuhirren) liitos ristikon alapaarteeseen sekä yläpohjapalkkia kannattelevan vetosauvan liitos





**Kuva 8.9** Liitos numero 4: vinosauvojen liitos riippuhirteen ja alapaarteen jatkosliitos



**Kuva 8.10** Liitos numero 5: ristikon harjaliitos

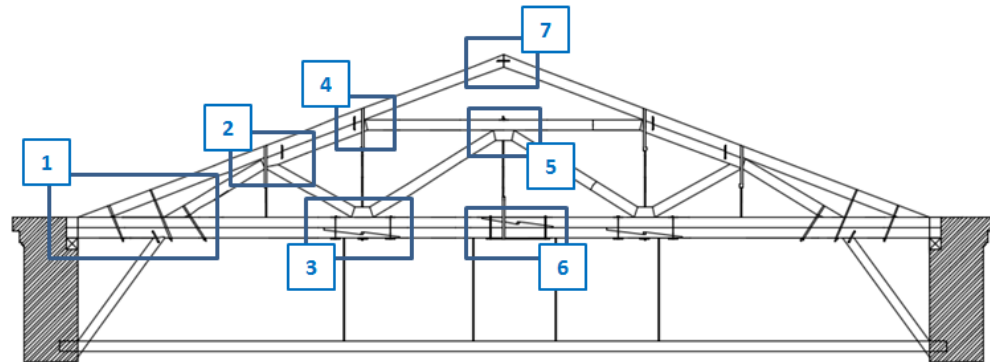
Edellä esitetyissä kuvissa on näkyvissä useita perinteisissä puurakenteisissa ristikoissa käytettyjä liitostapoja, kuten esimerkiksi alapaarteen hammaslapaliitos sekä vinosauvojen loviliitoksia. Lisäksi ristikoissa on käytetty riippuhirsiä, rautapantoja ja –pultteja sekä hakoja.

## 8.2.2 Savunpoistohormin viereiset kattoristikot

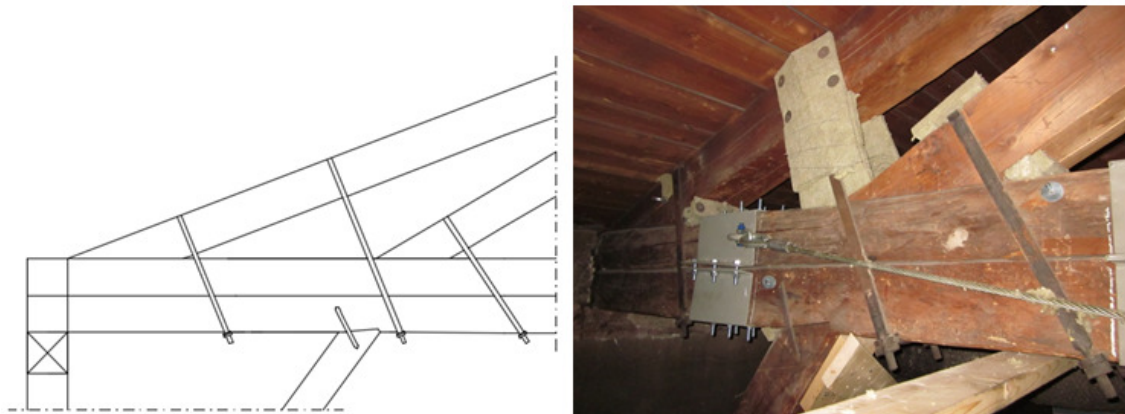
Katsomon ullakolla savunpoistohormin kummallakin puolella olevat kattoristikot ovat rakennemalliltaan samantyyppisiä näyttämön kattoristikoiden kanssa. Näyttämön ristikoita kuormittaa erityisesti näyttämötekniikan kiinnitykset ja savunpoistohormin viereisiä ristikoita hormilta tulevat kuormat, sillä ristikot on kiinnitetty siihen rautavöillä. Näihin ristikoihin on haettu lisäkapasiteettia suuremmalla sauvamäärällä kuin katsomon kattoristikoissa. [18]

Savunpoistohormin viereisten ristikoiden rakennemalli on esitetty kuvassa 8.11, johon on numeroitu ristikon erilaiset liitostyypit. Liitostyyppien piirrosmallit ja valokuvat esitetään myöhemmin kuvissa 8.12–8.18. Näyttämön yläpuoliset ristikot eroavat kuvan

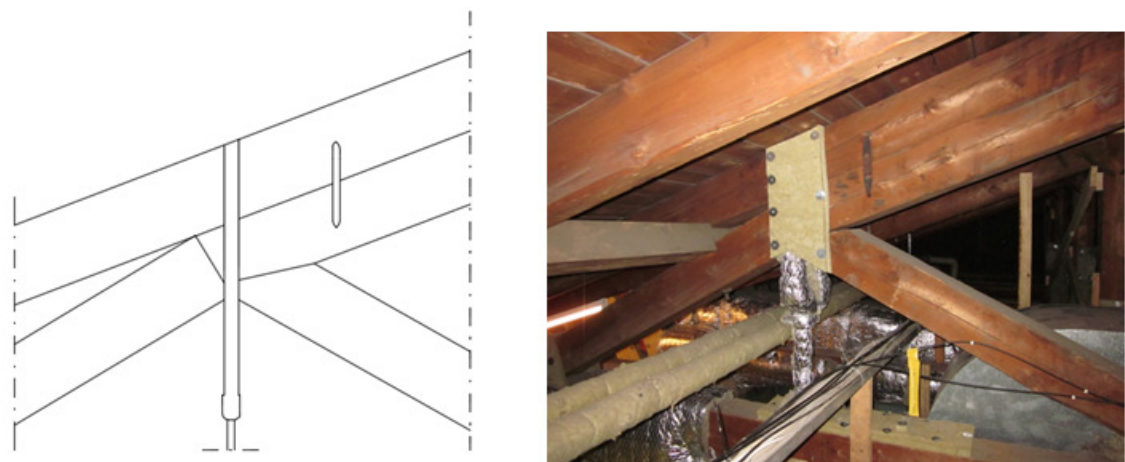
8.11 ristikkomallista pääasiassa siten, että niistä ei ole vetotankojen avulla kannatettu lattiapalkkeja, sillä näyttämön yläpuolella ei ole erillistä ullakkotilaa. Lisäksi näyttämön ristikoissa alapaarteiden jatkoskohdat ovat eri sijainneissa kuin kuvassa 8.11. [18] Liitoksista otetuissa valokuuvissa on näkyvissä yleisesti ristikoiden rautaisiin liitososiin tehtyjä palosuojausjauksia.



**Kuva 8.11** Savunpoistohormin viereinen ristikko

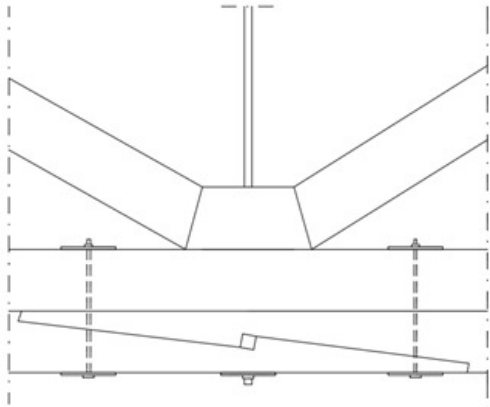


**Kuva 8.12** Liitos numero 1: ristikon liitos tuella

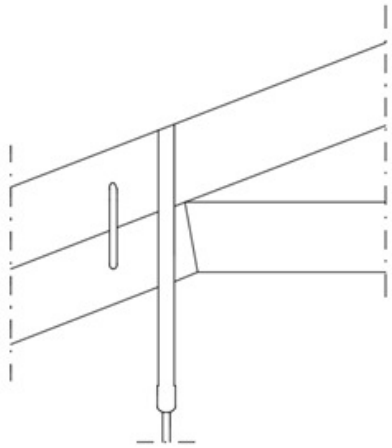


**Kuva 8.13** Liitos numero 2: diagonaalisauvojen liitos

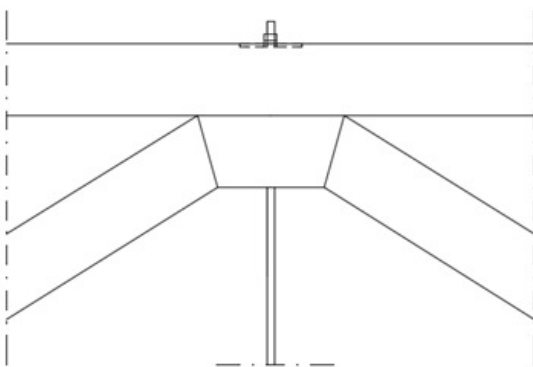




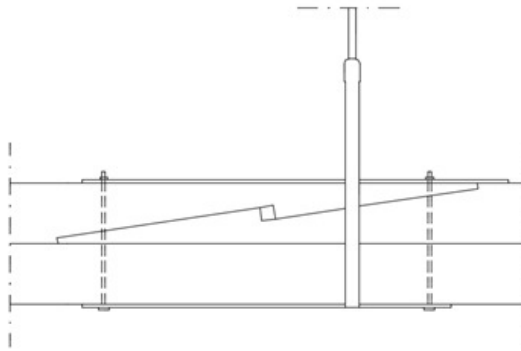
**Kuva 8.14** Liitos numero 3: diagonaalisauvojen välinen liitos



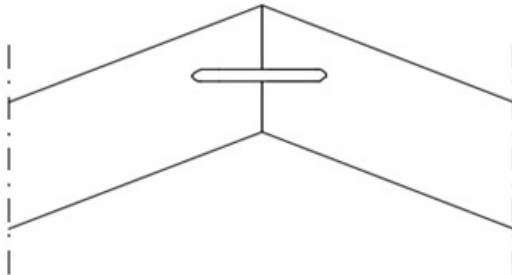
**Kuva 8.15** Liitos numero 4: vaakapalkin (kitapuun) liitos yläpaarteeseen (selkäpuuhun)



**Kuva 8.16** Liitos numero 5: diagonaalisauvojen liitos vaakapalkkiin (kitapuuhun)



**Kuva 8.17** Liitos numero 6: alapaarteen jatkosliitos, joka on kannatettu vetosauvalla



**Kuva 8.18** Liitos numero 7: ristikon harjaliitos

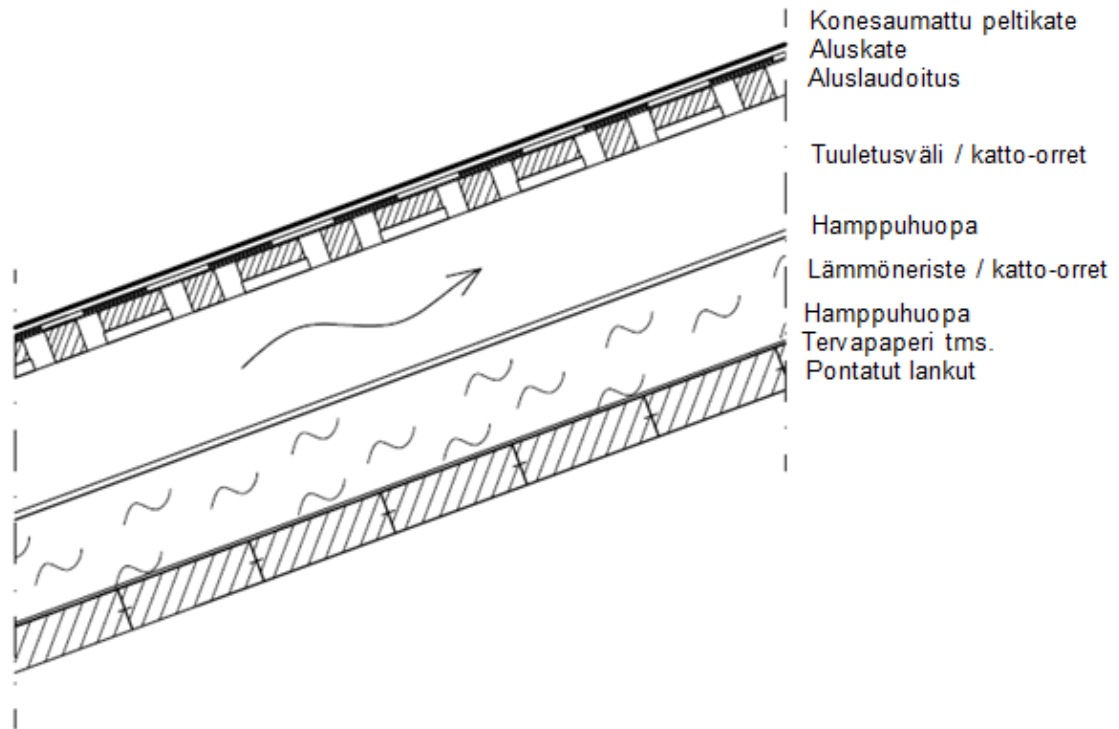
Edellä esitetyissä ristikoissa on perinteisiä lovi- ja puskuliitoksia sekä hammaslapaliitoksia. Liitososina on käytetty perinteisiä rautavöitä ja -hakoja sekä kannatusrautoja ja metallisia vetotankoja. Kuvassa 8.12 on lisäksi nähtävissä ristikon alapaarteen väliaikainen vaijerituenta.

### 8.2.3 Kattorakenteiden vahvistukset ja korjaukset

Vanhan teatterirakennuksen vesikattorakenteille on aikojen saatossa suoritettu pieniä kunnostus- ja korjaustoimenpiteitä, mutta pääosin katon kantavat rakenteet ovat säilyneet ennallaan. Näyttämön yläpuolisiin ristikoihin on aikojen saatossa tehty erilaisia ripustuksia, kuten näyttämötekniikan kiinnityksiä ja rautaisen paloesaripun kiinnitys [27, s. 80]. Viimeisin laajempi peruskorjaus on tehty vuonna 1980, jolloin näyttämön yläpuolisia ristikoita vahvistettiin lisäämällä niiden liitoksiin vanerivahvistuksia. Peruskorjauksen yhteydessä katsomon ullakolle asennettiin teatterin nykyiset ilmanvaihtolaitteet, joita päivitettiin vuoden 2000 muutostöiden yhteydessä [27, s. 84]. Ristikoissa on havaittu muodonmuutoksia, joihin on reagoitu tekemällä ristikoihin väliaikaisia vahvistuk-

sia. Teatteriin on tulossa laaja peruskorjaus, jonka yhteydessä kattorakenteisiin on suunniteltu tehtäväksi pidempiaikaisia vahvistuksia. [18]

Teatterin katsomon ja näyttämön päällä oleva vesikate on uusittu vuonna 2007 [27, s. 74]. Rakenneavauksen perusteella teatterin vanhan osan vesikaton rakenne on nykyisellään kuvan 8.19 mukainen. Vesikattokorjauksen yhteydessä konesaumattun peltikatteen alle asennettiin aluskate, jonka tarkoitus on vähentää vesikaton puurakenteiden kosteusrasitusta. Korjauksessa käytetty aluskate on bituminen aluskate, jonka alapinnassa on kondenssisuojana nukkakerros. Tällainen aluskate soveltuu erityisesti suojelukohteisiin, joissa katon korkoasemaa ei merkittävästi voida muuttaa, sillä se ei vaadi erillistä tuuletusrakoa aluskatteen ja saumakatteen välillä. [21, s. 81] Kondenssisuojatusta aluskatteessa kosteus imeytyy aluskatteen nukkakerrokseen ja haihtuu aikanaan tuuletusvälissä kulkevan ilmavirran mukana pois [54].



**Kuva 8.19** Teatterin vanhan osan vesikatto [18]

Kattoristikoihin on tehty taipumamittauksia ja niiden perusteella katsomon yläpuolisiin kolmeen merkittävimmin taipuneeseen ristikkoon on vuonna 2015 asennettu väliaikaiset vaijerituennat. Ristikoiden alapaarteisiin on kiinnitetty pulttikiinnityksellä teräskotelot, joihin hitsattuihin korvakkeisiin on kiinnitetty vaijerit. Lisäksi vuonna 2015 ristikoihin on lisätty nurjahdustuenta. Vuonna 2016 katsomon ristikoihin on lisätty vetosauvoja ala- ja yläpaarten välille. [18]

## 8.2.4 Ristikoiden vaurioituminen

Ristikoissa on havaittavissa erilaisia, aikojen saatossa syntyneitä vaurioita. Ristikoissa on näkyvissä kosteusjälkiä, joiden voidaan olettaa syntyneen ennen vesikaton viimeisimpiä korjaustöitä vuonna 2007. Ristikoiden alapaarteissa on paarteen pituussuuntaisia, puun kuivumiskutistumisesta aiheutuneita halkeamia. Ristikoiden liitoksissa on yleisesti havaittavissa siirtymiä ja kiertymiä, jotka muuttavat voimien siirtymistapaa ja ristikon rakenteellista toimintaa. [18]

Vesikattorakenne on altis kosteuden kondensoitumiselle sen heikon tuuletuksen vuoksi, mutta kondenssisuojattu aluskate on saattanut parantaa tilannetta. Vesikatolle tehdyn rakenneavauksen perusteella katon harjalla yläpohjan eristeet olivat tutkimushetkellä kuivia, mutta katto-orsissa oli havaittavissa lahovaurioita, jotka oletettavasti ovat syntyneet jo ennen viimeisimpiä vesikattokorjauksia. [18]

Kattorakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteet ovat erilaiset kuin 1800-luvulla. Ullakon lattiaan on muun muassa lisätty eristystä sekä lämmöneristys- että palosuojaussyistä. Myös teatteriin jälkikäteen lisätty koneellinen ilmanvaihto on muuttanut teatterin rakennusfysikaalisia olosuhteita. Lämpö- ja kosteusteknisten olosuhteiden muuttuminen on saattanut vaikuttaa ristikoihin. [18]

Teatterin ristikoille tehdyissä tutkimuksissa teatterin vanhan osan kattoristikoissa on havaittu suurehkoja taipumia. Taipumille on suoritettu tarkemmittauksia, mutta taipumat ovat myös silmämääräisesti havaittavissa erityisesti vesikaton harjan ja lappeen suuntaisina taipumina. Peltikatteelle tehtyjen tutkimusten perusteella vesikaton ristikoiden merkittävimpien taipumien on päätelty tapahtuneen todennäköisesti vasta vuoden 2007 vesikattokorjausten jälkeen peltikatteessa havaittujen muodonmuutosten perusteella. [18]

Ristikoiden vaurioituminen johtuu todennäköisesti osakseen kuormien lisääntymisestä, sillä näyttämön yläpuolisiin ristikoihin on muun muassa tehty näyttämötekniikan ja lavasteiden ripustuksia sekä rautaisen paloesaripun kiinnitys ja katsomon ullakolle on asennettu IV-koneita. Mahdollinen syy ristikoiden taipumiseen on saattanut olla ristikoiden kuormien hetkellinen lisääntyminen viime vuosien runsaslumisten talvien vuoksi. Suomessa esiintyi 2010-luvun alkupuolella useita peräkkäisiä runsaslumisia talvia. Erityisesti talvella 2010–2011 sattui useita rakennusten sortumia ja vaaratilanteita katoille kinostuneen lumen vuoksi. Rakennusten peruslumikuormat ylittyivät tällöin yleisesti etelä- ja länsirannikolla. [34]

Tehtyjen tutkimusten perusteella erityisesti katsomon yläpuolisissa ristikoissa on havaittu vaurioita ja muodonmuutoksia. Silmämääräisten havaintojen perusteella vesikaton harja on taipunut eniten savunpoistohormin puoleisesta päädyistä kuvan 8.20 mukaisesti.



Hormin viereisissä ristikoissa on havaittu vaakasiirtymiä, jotka saattavat osittain johtua massiivisen hormin painumisesta. [18]

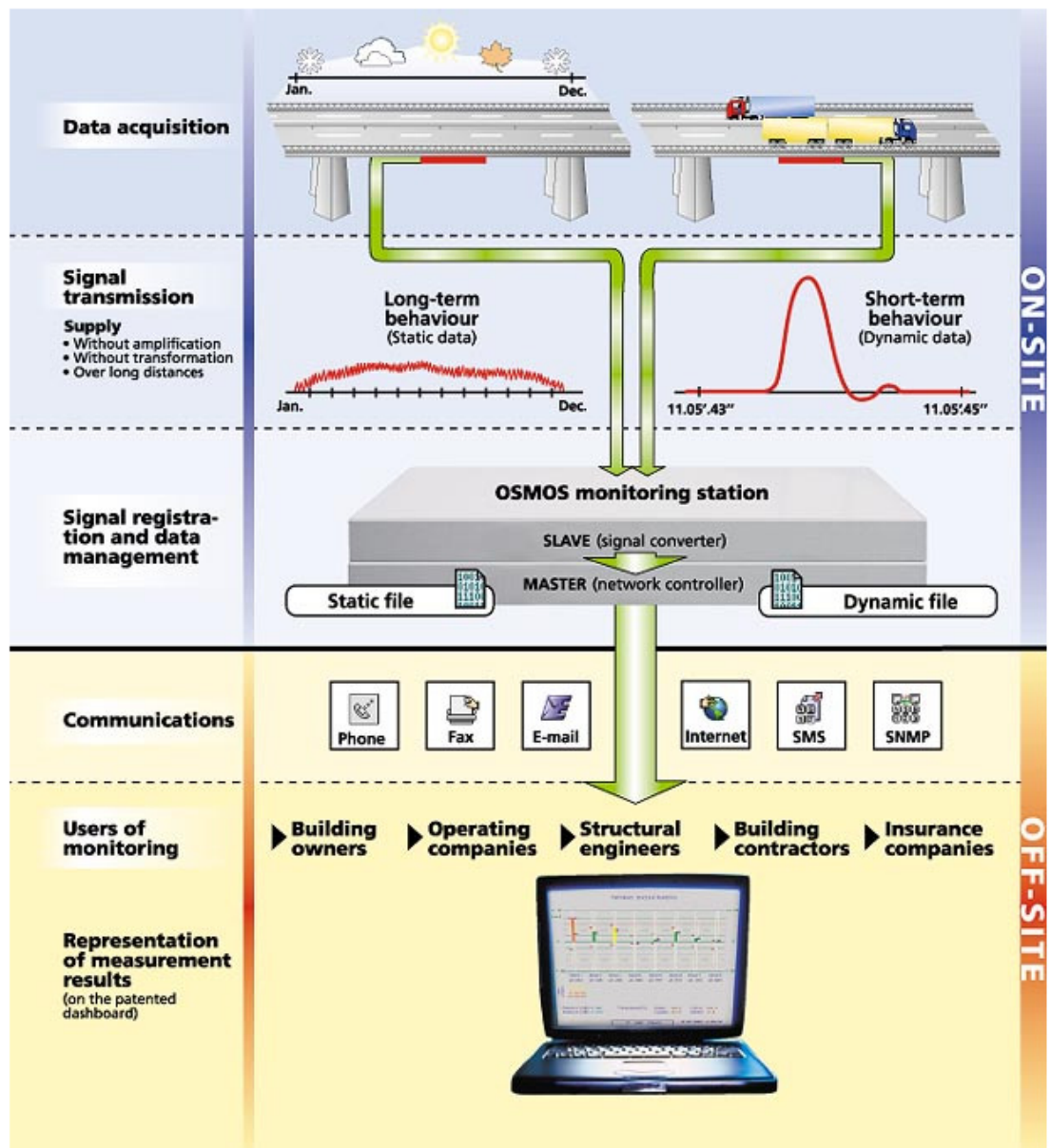


**Kuva 8.20** Vesikaton taipuma vuonna 2015 [18]

Aleksanterin teatterin kattoristikoiden vaurioiden syntymisajankohtaa tai selkeää yksiselitteistä syytä vaurioiden syntymiselle ei pystytä lausumaan, vaan todennäköisesti monien eri tekijöiden summa on aiheuttanut ristikoiden muodonmuutokset. Silmämääräisesti havaitut vauriot osoittavat, että ristikoiden kuormankantokyky on jossakin kohtaa ylittynyt. [18]

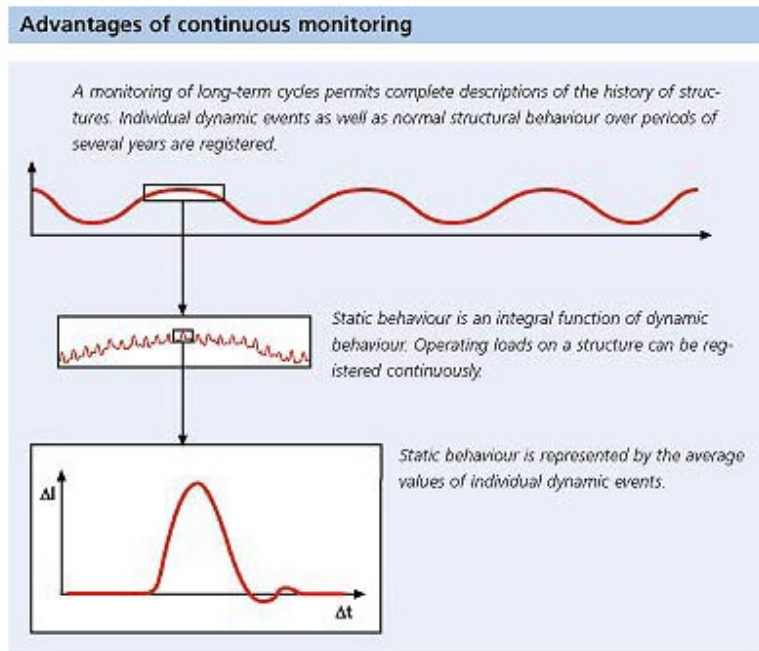
### 8.2.5 Vauriokehityksen seuranta

Teatterin kattorakenteisiin asennettiin vuonna 2015 muodonmuutosten seurantaan varten OSMOS-monitorointijärjestelmä. Järjestelmässä on valokuituteknologiaan perustuvat mitta-anturit, jotka kiinnitetään rakenteeseen sen pintaa myötäillen. Järjestelmä perustuu valokuituun lähetettävän ja siitä vastaanotettavan valon määrän mittaamiseen. Valokuidussa tapahtuu valon vaimenemista, mikäli sen päiden välillä tapahtuu liikettä. Jatkuvassa monitoroinnissa anturit on kytketty automaattiseen järjestelmään, joka tallentaa antureilta tulevan tiedon muistiin ja lähettää sen eteenpäin palvelimelle. [43, s. 64] Kuvas-  
sassa 8.21 on esitetty optisen monitoroinnin idea.



*Kuva 8.21 Optisen monitoroinnin toimintaidea [35]*

Optisella monitoroinnilla saadaan tietoa sekä rakenteen staattisista, hitaista muutoksista että dynaamisista, ulkopuolisten voimien aiheuttamista muutoksista. Eri antureilta saatava mittaustieto on verrattavissa keskenään, sillä se esitetään samalla aikajanalla ja samassa kuvaajassa. Rakenteessa tapahtuneet muutokset voidaan jälkikäteen paikantaa mittaustiedoista sekunnin tarkkuudella, joten mahdolliset ympäristön tapahtumien vaikutukset rakenteessa voidaan tarvittaessa kohdentaa. [43, s. 65] Kuvassa 8.22 on havainnollistettu staattisen mittausdatan poimimista dynaamisen käyttäytymisen käyrästä.



**Kuva 8.22** Mittausdata optisessa monitoroinnissa [35]

OSMOS-järjestelmässä anturit ovat sähkömagneettisesti neutraaleja, joten muutokset sähköjakelujärjestelmässä eivät vaikuta niiden toimintaan. Valon etenemisen mittaus- tulokset tallentuvat mittauskeskukseen, josta ne siirtyvät palvelimelle. [43, s. 64–65]

Kuvassa 8.23 on Aleksanterin teatteriin asennetun OSMOS-järjestelmän mittauskeskus.



**Kuva 8.23** Monitorointijärjestelmän mittauskeskus [18]

OSMOS-järjestelmän mittauskeskukseen siirtyvät mittaustulokset ovat reaaliaikaisesti seurattavissa. Monitorointijärjestelmään voidaan asentaa hälytysrajat rakenteesta mitatun normaalikäyttämisen perusteella. [43, s. 64–65]

Aleksanterin teatterissa kattoristikoiden pituussuuntaisten kuivumiskutistumahalkeamien käyttäytymisen seuranta varten on ristikoiden alapaarteisiin kiinnitetty siirtymäpleksejä [18]. Tällainen pleksi on esitetty kuvassa 8.24.



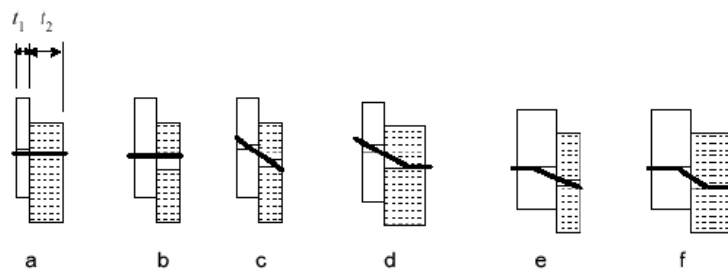
**Kuva 8.24** Alapaarten halkeamaleveyden seuranta siirtymäpleksin avulla [18]

Kuvan 8.24 mukaiset, halkeaman eri puolille kiinnitetyt pleksit pääsevät liikkumaan vapaasti toistensa suhteen. Tällöin levyihin tehtävien merkintöjen avulla halkeaman leveyden muutoksia voidaan karkealla tarkkuudella seurata. [18]

## 8.3 Ristikoiden vahvistaminen

### 8.3.1 Kantokyvyn ylittyminen

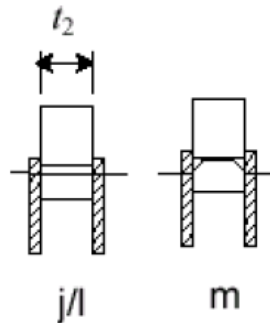
Puurakenteiden suunnitteluohjeessa (Eurokoodi 5) on esitetty puikkoliitosten murtumistavat [7, s. 56]. Aleksanterin teatterissa katsomon kattoristikoiden alapaarteiden jatkosliitoksissa on havaittavissa siirtymää [18]. Liitosten rautapultit vaikuttavat kääntyneen kuvan 8.25 murtumistapa c:n, d:n tai e:n mukaisesti [7, s. 56].



**Kuva 8.25** Pulttiliitoksen murtumistavat [7, s. 56]



Aiemmin kappaleessa 8.2.1 esitetystä ristikon alapaarteen jatkosliitoksesta on paarteen sivuilla lattateräkset, jotka on kiinnitetty pulttiliitoksilla paarteeseen [18]. Kuvassa 8.26 on esitetty paksujen teräslevyjen ja puun välisen kaksileikkeisen liitoksen murtumistavat.



**Kuva 8.26** Paksujen teräslevyjen ja puun välisen liitoksen murtumistavat kaksileikkeisessä liitoksessa [7, s. 57]

Taulukossa 8.1 on esitetty alapaarteen jatkosliitoksen kestävyyslaskennan tuloksia. Laskennat on tehty puun lujuusluokille C24-C40, sillä puun lujuudesta ei ole varmuutta. Jokaisella käytetyllä lujuusluokan arvolla liitoksen laskennallinen kapasiteetti ylittyy. Laskennassa on käytetty varmallalla puolella olevia lujuusarvoja ja varmuuskertoimia. Lisäksi kuormien laskennassa on käytetty vaativinta luotettavuusluokkaa CC3, joka aiheuttaa 10 prosentin korotuksen laskentakuoormiin. Liitteessä B on esitetty katsomon kattoristikon rakenneanalyysi.

**Taulukko 8.1** Alapaarteen jatkosliitoksen kestävyys

Lujuusluokka	Pultit	Murtotapa	Liitoksen kapasiteetti $R_d$ [kN]	Alapaarteen vetoarastus $F_d$ [kN]	Käyttöaste
C24	2+4 M24	d) & m)	154,1	373,2	2,4
C30	2+4 M24	d) & m)	160,7	373,2	2,3
C40	2+4 M24	d) & m)	169,2	373,2	2,2

Tämän työn liitteessä C on esitetty katsomon kattoristikon rakenneanalyysin perusteella tehtyjä sauvojen kestävyystarkasteluja. Taulukossa 8.2 on esitetty ristikon alapaarteen kestävyys yhdistetyn taivutuksen ja vedon suhteen. Tarkastelut on tehty puun lujuusluokille C24-C40.

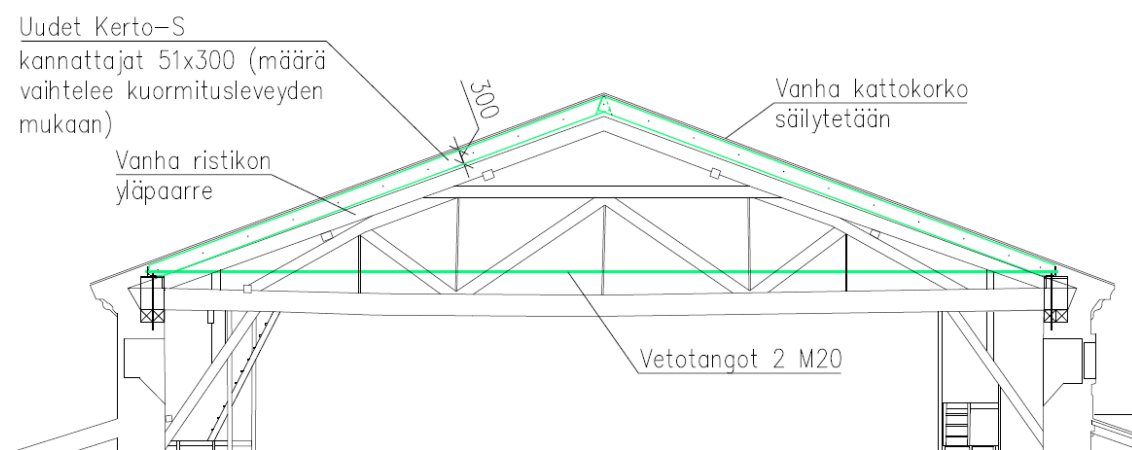
**Taulukko 8.2** Alapaarteen laskennalliset käyttöasteet

Sauva	Taivutusjännitys $\sigma_{m,y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Vetojännitys $\sigma_{t,0,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Käyttöaste, yhdistetty taivutus ja veto: C24	Käyttöaste, yhdistetty taivutus ja veto: C30	Käyttöaste, yhdistetty taivutus ja veto: C40
AP1	9,2	6,6	1,50	1,18	0,89

Laskennallisten tarkastelujen perusteella ristikon alapaarten kestävyys osittain ylittyy. Puurakenteen todellisesta lujuudesta ei ole kuitenkaan varmuutta. Lisäksi laskennallisissa tarkasteluissa mitoituskuormat ja -lujuudet sisältävät varmuuskertoimensa puolesta ylimääristä varmuutta, mikä tavallisesti sallii satunnaiset ylikuormitustilanteetkin [7, s. 25]. Laskennallisissa tarkasteluissa nykytilanteen mukaisen käyttöasteen tulisi kuitenkin olla alle 1,0 [39, s. 18].

### 8.3.2 Vahvistusmenetelmä

Teatterin katsomon kattoristikossa havaitut muodonmuutokset edellyttävät ristikoiden vahvistustoimenpiteitä. Nykyisille ristikoille tulevia kuormia voidaan siirtää uudelle kantavalle rakenteelle, jolloin ristikoiden rasitus pienenee. Uudeksi kantavaksi rakenteeksi soveltuvat esimerkiksi vetotangolliset kolminivelkattotuolit. Kannattajina käytetään kertopuupalkkeja, jotka on harjalta yhdistetty nivelellisesti. Kannattajat asennetaan vanhoihin kattoristikoihin kiinnitetyn ponttilankutuksen yläpuolelle, jolloin kannattajat jäävät piiloon yläpohjarakenteiden sisälle. Palkkien alapää yhdistetään toisiinsa teräksisillä vetotangoilla, joiden tarkoitus on siirtää tukipisteille tulevia vaakavoimia. Vetotangot viedään ullakkotilaan. Uusien kannattajien periaate on esitetty kuvassa 8.27.



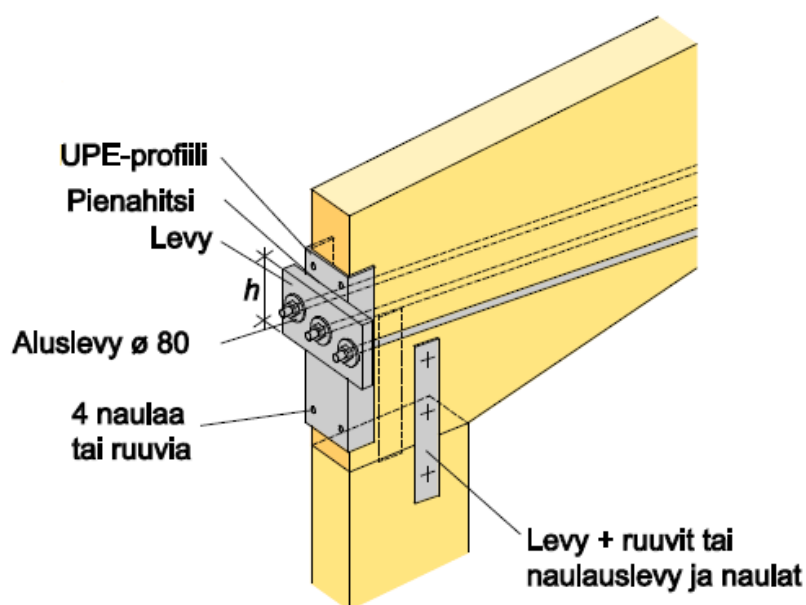
**Kuva 8.27** Vesikaton uusi kannatusrakenne

Edeltävässä kappaleessa mainitulla vahvistustavalla vanhat kattoristikot voidaan säilyttää ilman merkittäviä, näkyviä rakenteellisia vahvistuksia, mikä on suojelukohteessa tärkeää. Vanhat ristikot jäävät kannattelemaan ullakon välipohjaa. Vanhojen ristikoiden liitoksia vahvistamalla ristikoiden nykyistä kuormankantokykyä saadaan parannettua.

Käytettävien kertopuukannattajien korkeuden määrää nykyinen kattokorko, jota ei voida rakennuksen suojelusyistä merkittävästi muuttaa. Uudet kannattajat voidaan sijoittaa nykyisten ristikoiden yläpaarteiden yläpuolelle, jolloin vanha ponttilaudoitusta jää ullakolle näkyviin. Tällöin uusien palkkien sallittu korkeus on vain noin 300 millimetriä. Siten poikkileikkauksen tarvittava jäykkyys on muodostettava valitsemalla palkille riittävä leveys.

Vetotangollisen kolminivelkattotuolin palkit mitoitetaan samalla tavalla, kuin taivutetut ja puristetut palkit. Palkit mitoitetaan katon tasoa vastaan kohtisuoralle nurjahdukselle. Kehärakenteen harjalla ja tuilla tarkistetaan leikkausjännitykset ja puristusjännitykset, jotka kohdistuvat vinosti puun syysuuntaan nähden. Myös vetotangon ja puupalkin liitoksen mitoituksessa tulee huomioida, että tangon vetovoima vaikuttaa vinosti puun syysuuntaan nähden. Kehän harjaliitos mitoitetaan nivelenä, jolloin se ei teoreettisesti siirrä taivutusmomenttia. Liitoksessa vaikuttaa yhtä suuri, mutta erisuuntainen vaakavoima kuin vetotangossa. Harjaliitos mitoitetaan siirtämään myös leikkausvoimia, jotka aiheutuvat epäsymmetrisestä kuormitustapauksesta katon lappeilla. Tällainen kuormitustapaus voi syntyä esimerkiksi lumenpoiston yhteydessä, kun lumikuorma on poistettu vain katon toiselta lappeelta. [26, s. 154]

Vetotanko ankkuroidaan palkkeihin. Symmetrisyyden vuoksi vetorasituksia voidaan siirtää yhden vetotangon sijasta kahdella vetotangolla, jotka asennetaan palkin kummallekin puolelle. Vetotangot ankkuroidaan esimerkiksi palkkien päihin kiinnitettävien teräslevyjen avulla. Teräslevyjen alle voidaan sijoittaa esimerkiksi lyhyt UPE-profiili, joka jakaa teräslevyltä tulevan voiman suuremmalle alueelle. Kuvassa 8.28 on havainnollistettu vetotankojen ja palkin liitostapaa. Kuvan 8.28 keskimmäistä vetotankoa varten on palkkiin porattu reikä, mikä on asennusteknisesti työläs ratkaisu. Suurille vetovoimille käytetään tavallisesti kahta, palkin kummallekin puolelle sijoitettavaa vetotankoa. Vetotankojen ankkuroinnin mitoituksessa tulee huomioida terästangon vetokestävyyden lisäksi aluslevyn ja muttereiden kestävyys sekä teräslevyn aiheuttama tukipaine palkin päähän syitä vastaan vinosti. [26, s. 158, 266] Vetotankojen lujuuden tulisi olla väliltä  $355\text{--}600\text{ N/mm}^2$ . Vetotangon lujuuden tulee olla tarpeeksi suuri, jotta sen päät saadaan kierteistettyä. Tangon lujuus ei saa kuitenkaan olla liian suuri, ettei vetotanko rajoita liikaa rakenteen vaakasiirtymiä. [26, s. 158]



**Kuva 8.28** Vetotankojen ankkurointi palkin päähän [26, s. 158]

Kolminivelkattotuoleissa käytettävät teräksiset vetotangot ovat usein jänneväliinsä nähden poikkileikkaukseltaan pieniä. Yleensä vetotangot esikiristetään vähintään pysyvistä kuormista aiheutuvaa vetovoimaa vastaan. Ilman esikiristystä vetotangon omasta painosta syntyvä taipuma muodostuisi suureksi. [38, s. 23] Jos vetotankoa ajatellaan yksiaukkoisena palkkina, joka on päistään kiinteästi tuettu, saadaan sen taipuma omasta painosta kaavalla 8.1 [40, s. 455]

$$v = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{EI} \quad (8.1)$$

missä

$q$  on tasaisesti jakautunut viivakuorma

$L$  on jänneväli

$E$  on vetotangon kimmomoduli

$I$  on vetotangon jäyhyysmomentti

Ympyräpoikkileikkauksen jäyhyysmomentti voidaan määrittää kaavalla 8.2 [40, s. 383]:

$$I = \frac{\pi d^4}{32} \quad (8.2)$$

missä

$d$  on vetotangon halkaisija

Edellä mainituilla kaavoilla esimerkiksi jänneväliltään 20 metriä ja halkaisijaltaan 30 millimetriä olevan vetotangon taipumaksi sen omasta painosta saadaan 1347 millimetriä.

Kolminivelkattotuolin harjaliitos suunnitellaan nivelelliseksi, jolloin se välittää vain pystysuoria ja vaakasuoria voimia. Tällöin liitoksen tulee sallia palkkien kulmanmuutos. Palkkien kiertymismahdollisuus voidaan varmistaa viistoamalla liitettävien palkkien yläreunat ja asentamalla liitososa mahdollisimman lähelle liitoksen alareunaa. [26, s. 264–265]

### 8.3.3 Kertopuupalkkien mitoitus

Uudet kattokannattajat kannattelevat vesikaton lumi- ja hyötykuorman sekä kattorakenteiden ja uusien kannattajien oman painon. Vanhat eristeet pyritään säilyttämään. Kattokorko säilytetään nykyisessä tasossa.

Kolminivelkattotuolien palkit mitoitetaan taivutettuina ja puristettuina rakenneosina. Palkit mitoitetaan leikkausvoimaa ja taivutusmomenttia sekä yhdistettyä taivutusta ja puristusta vastaan. Lisäksi palkkien taipuma ja tukialueen kestävyys syitä vastaan vinoja puristusrasituksia vastaan tulee tarkistaa. [26, s. 64]

Palkin kestävyysmitoitettava tekijä vaihtelee yleisissä tapauksissa palkin jännevälin mukaan. Leikkausvoima saattaa tulla mitoittavaksi sellaisissa tapauksissa, joissa palkin jänneväli on lyhyt sen korkeuteen verrattuna. Pitkillä jänneväleillä taas palkin mitoittavaksi tekijäksi tulee yleensä taivutusmomentti tai taipuma. [26, s. 64]

Kertopuupalkit mitoitetaan yhdistetylle taivutukselle ja puristukselle. Yhteen suuntaan taivutetun palkin poikkileikkauksen tulee täyttää ehto 8.3 [7, s. 40]

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (8.3)$$

missä

$\sigma_{c,0,d}$  on puristusjännityksen mitoitussarvo

$f_{c,0,d}$  on puristuslujuuden mitoitussarvo

$\sigma_{m,y,d}$  on taivutusjännityksen mitoitussarvo

$f_{m,y,d}$  on taivutuslujuuden mitoitussarvo

Suorakaidepoikkileikkaukselle taivutusjännityksen mitoitussarvo saadaan laskettua kaavalla 8.4 [7, s. 44]

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6M_d}{bh^2} \quad (8.4)$$

missä

$M_d$  on taivutusmomentin mitoitussarvo

$b$  on palkin leveys

$h$  on palkin korkeus

Palkin taivutuskestävyyden tulee täyttää epäyhtälön 8.5 mukainen ehto [7, s. 38]

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (8.5)$$

missä

$\sigma_{m,d}$  on taivutusjännityksen mitoitussarvo

$f_{m,d}$  on taivutuslujuuden mitoitussarvo

Palkin mitoitusehto leikkausvoiman suhteen on epäyhtälön 8.6 mukainen [7, s. 38]

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (8.6)$$

missä

$\tau_d$  on leikkausjännityksen mitoitussarvo

$f_{v,d}$  on leikkauslujuuden mitoitussarvo

Palkin leikkausjännityksen mitoitussarvo saadaan suorakulmaiselle palkille laskettua kaavalla 8.7 [7, s. 48]

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef}h} \quad (8.7)$$

missä

$V_d$  on leikkausvoiman mitoitusarvo

$b_{ef}$  on palkin tehollinen leveys

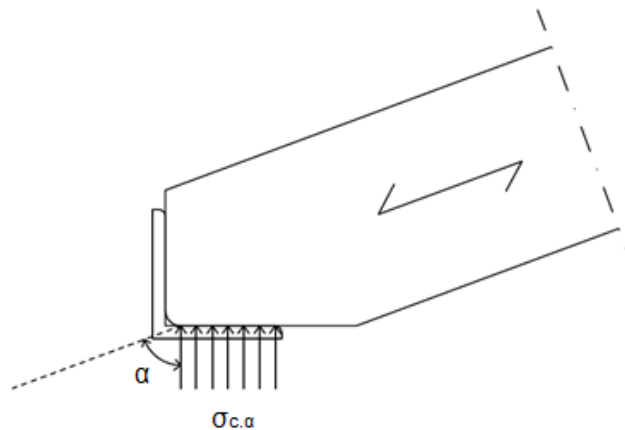
$h$  on palkin korkeus

Palkin tehollisen leveyden laskennassa huomioidaan halkeamien vaikutus palkin poikki-leikkaukseen. Palkin tehollinen leveys saadaan laskettua kaavalla 8.8 [7, s. 38]

$$b_{ef} = k_{cr}b \quad (8.8)$$

Kaavassa 8.8 kerroin  $k_{cr}$  riippuu puutavaran tyypistä. Kertoimen suositeltava arvo on sahatavaralle ja liimapuulle 0,67, muille puutuotteille 1,0. [8, s. 38]

Palkkien tukipinnan muotoilu on vino katon kallistuksesta johtuen. Tästä syystä palkin kestävyys syysuuntaan nähden vinosti vaikuttavia puristusjännityksiä vastaan tulee tarkistaa. Kuvassa 8.29 on havainnollistettu palkin liitosta tuella.



**Kuva 8.29** Palkin tukialueen syysuuntaan nähden vino puristusjännitys

Vinon puristusjännityksen tulee täyttää ehto 8.9 [7, s. 40]

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90}f_{c,90,d}}(\sin \alpha)^2 + (\cos \alpha)^2} \quad (8.9)$$

missä

$f_{c,0,d}$  on puristuslujuuden mitoitusarvo syysuuntaisessa puristuksessa

$k_{c,90}$  on kerroin, joka huomioi syysuuntaa vastaan kohtisuorat jännitykset

$f_{c,90,d}$  on puristuslujuuden mitoitusarvo syysuuntaa vastaan kohtisuorassa puristuksessa

$\alpha$  on puristusjännityksen ja syysuunnan välinen kulma

Taulukossa 8.3 on yhteenveto kannattajien mitoituslaskelmista. Liitteessä A on esitetty kannattajien laskennassa käytetyt mitoituskuormat.

**Taulukko 8.3 Kannattajalaskelmien yhteenveto**

Kannattaja	Kuormitus- leveys [mm]	Poikki- leikkaus bxh [mm]	Käyttöaste: taipuma	Käyttöaste: yhdistetty taivutus ja puristus	Käyttö- aste: taivutus	Käyttö- aste: leikkaus	Käyttö- aste: tuki- paine- kestävyys
K-1	2122	1020x300	0,97	0,33	0,33	0,11	0,16
K-2	1658	714x300	0,97	0,37	0,37	0,12	0,18
K-3	2017	1020x300	0,96	0,33	0,33	0,11	0,16
K-4	1902	816x300	1,00	0,37	0,37	0,12	0,18
K-5	1304	612x300	0,88	0,34	0,34	0,11	0,16
K-6	1834	816x300	0,97	0,36	0,36	0,11	0,17
K-7	1861	816x300	0,99	0,36	0,36	0,12	0,17
K-8	1519	612x300	1,00	0,39	0,39	0,12	0,19
K-9	1591	714x300	0,94	0,36	0,36	0,11	0,17

Taulukon 8.3 mukaiset kannattajien poikkileikkaukset koostuvat yksittäisistä kerto-S palkeista (bxh=51x300 mm). Näin ollen kertopuupalkkien lukumäärää voidaan vaihdella kannattajan kuormitusleveyden mukaan. Kertopuupalkkien sijainti on esitetty liitteessä E. Kehän K-1 rakenneanalyysi on esitetty liitteessä D. Kehät K-2 - K-9 on analysoitu vastaavalla tavalla kuin kehä K-1, mutta näiden mitoituskuormat vaihtelevat erilaisista kuormitusleveyksistä johtuen.

### 8.3.4 Vetotankojen mitoitus

Vetotankojen vaadittava poikkileikkausala voidaan laskea kaavalla 8.10 [26, s. 158]

$$A_s = \frac{q_d \cdot l^2}{8 \cdot f} \cdot \frac{1,4}{f_{ub}} \quad (8.10)$$

missä

$q_d$  on tasan jakautunut kehään kohdistuvan viivakuorman mitoitusarvo

$l$  on vetotangon pituus

$f$  on vetotangon etäisyys harjanivelestä (kehän korkeus)

$f_{ub}$  on vetotangon myötöraja

Taulukossa 8.4 on esitetty yhteenveto vetotankojen mitoituslaskelmien tuloksista.

**Taulukko 8.4** Vetotankojen mitoituksen yhteenveto

Kannattaja	Veto- tangot, teräs S355	Käyttöaste: veto- kestävyys	Käyttöaste: teräsle- vyn tukipaine palkin päässä
K-1	2 M20	0,76	0,25
K-2	2 M20	0,59	0,27
K-3	2 M20	0,76	0,24
K-4	2 M20	0,67	0,27
K-5	2 M20	0,47	0,25
K-6	2 M20	0,65	0,26
K-7	2 M20	0,66	0,27
K-8	2 M20	0,53	0,29
K-9	2 M20	0,57	0,26

Vetotankojen liitos palkkeihin toteutetaan teräspäätylevyjen avulla. Harjaterästankojen päihin tehdään täyskapasiteettikierteet, ja tangot kiinnitetään päätylevyihin muttereilla. Laskelmissa tarkastetaan vetotankojen vetokestävyys sekä teräspäätylevyjen aiheuttama tukipaine palkin päähän, joka aiheuttaa puun syihin nähden vinoja puristusjännityksiä. [26, s. 154, 158]



## 9. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Puurakentaminen on saavuttanut Suomessa pitkän historian. Puumateriaalin helppo saatavuus näkyy jo vuosisatojakin vanhoissa rakenteissa, jotka ovat säilyneet ensiluokkaisen puurakentamistaidon ansiosta. Lujien kirvesmiesliitosten veistäminen on vaatinut äärimmäistä huolellisuutta ja ammattitaitoa. Ammattipuusepät ovat osanneet valita puurakentamiseen soveltuvia puulaatuja ja siten on saavutettu kestäviä rakenteita.

Vanhoissa kattoristikoissa ei ole juurikaan ymmärretty rakenteellisten voimien siirtymisestä, vaan alkujaan rakenteet ovat muotoutuneet kokemuksen perusteella. Vanhoissa rakenteissa onkin usein poikkileikkauskokojensa puolesta paljon ylimääräistä kapasiteettia. Vanhat puurakenteet ovat aina yksilöllisiä rakenteita, joiden tarkasteluissa tulee huomioida niiden yksilölliset ominaispiirteet.

Perinteiset puuliitokset ovat pääasiassa puristusliitoksia, mutta kirvesmiesliitoksilla pystytään välittämään tehokkaasti myös vetojännityksiä. Perinteiset puuliitokset eroavat rakenteeltaan paljon nykyrakentamisen mukaisista liitoksista. Perinteinen puurakentamistaito on väistynyt osaamisalue, joka elää pääosin kirjallisuudessa ja iäkkäiden rakennusalan ammattilaisten tietotaitona. Korjausrakentamisessa on tärkeää tuntee vanhaa rakentamisperinnettä, jotta voidaan ymmärtää vanhojen rakenteiden toimintaa.

Rakenteiden vaurioitumista tulee tarkastella pitkällä ajanjaksolla ja etsiä syitä rakenteiden vaurioitumiselle sekä niiden syntymisajankohdalle. Tavallisesti vauriot johtuvat luonnollisista tekijöistä, mutta vanhoissa rakenteissa voi olla myös onnettomuuskuormien, kuten sotien ja tulipalojen aiheuttamia vaurioita. Rakennuksen historiaan on perehdyttävä, jotta sen nykykuntoa osataan tarkastella. Erilaisten vaurioitumismekanismien ymmärtäminen on tärkeää, jotta voidaan arvioida vaurioitumisen laajuutta ja vaikutuksia rakennuksen turvallisuuteen.

Rakennusten turvallisuutta tarkasteltaessa on ensiarvoista kiinnittää huomiota rakenteiden kantavuuteen. Vanhan kattoristikon kantavuuden arvioiminen perustuu ristikon sauvojen todellisen lujuuden määrittämisen lisäksi liitosten voimansiirtokyvyn arvioimiseen. Olemassa olevasta rakenteesta muodostetun rakennemallin perusteella ristikon sauvojen ja liitosten rasituksia on mahdollista tarkastella erilaisilla kuormitusyhdistelmillä. Näiden perusteella saatavaa rakenneanalyysiä voidaan verrata ristikon nykytilanteeseen. Laskentamallin perusteella voidaan arvioida, tukevatko mahdolliset havaitut vauriot rakenneanalyysin mukaisia oletuksia.

Kattoristikoiden vahvistaminen ei perustu ainoastaan niiden liitosten tai yksittäisten rakenneosien vahvistamiseen, vaan myös kuormien siirtäminen uudelle kantavalle rakenteelle voidaan lukea tehokkaaksi vahvistustavaksi. Tällöin vanha rakenne voidaan säilyttää rakennuksessa niin sanotusti museokäytössä ja se on myöhemmin palautettavissa. Vanhojen puuristikoiden lujuuden tutkimista varten on olemassa useita ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä. Useat näistä menetelmistä ovat työläitä, ja antavat puurakenteesta vain paikallista tietoa. Uudet kantavat rakenteet mitoitetaan nykystandardien mukaisesti, jolloin vanhojen rakenteiden lujuutta ei tarvitse tutkia.

Puurakenteiden vaurioituneita osia korvaamalla voidaan säästää mahdollisimman paljon vanhaa puurakennetta, mikä on suojelukohteissa tärkeää. Uudet puurakenteet voidaan kiinnittää vanhan rakennustavan mukaisesti, jolloin rakenteen vanha tyyli säilyy. Uusien rakenneosien kiinnittämiseksi on olemassa monia eri keinoja, joita voidaan punnita esimerkiksi esteettisten ja paloteknisten seikkojen nojalla. Puurakenteiden korjaamisessa uusien ja vanhojen rakenneosien yhteensopivuuteen on kiinnitettävä huomiota, sillä esimerkiksi puun ja teräksen lujuus- ja jäykkyysominaisuudet ovat erilaisia. Lisäksi niiden lämpö- ja kosteusmuodonmuutokset poikkeavat toisistaan, mikä saattaa johtaa liitoksen heikentymiseen.

Suojelunäkökulmat asettavat reunaehdoja korjausrakentamiselle. Arvokohteiden korjaamisessa on tärkeää suunnitella korjaustoimenpiteitä suojelunäkökulmien nojalla, ja käyttää vanhaa rakentamistapaa noudattavia korjaustapoja. Viime kädessä noudatetaan kuitenkin lakia rakennuksen turvallisuuden ja terveellisyyden saavuttamiseksi. Arvokohteisiin tehtävien rakennushistoriaselvitysten avulla selvitetään rakennuksen suojeltavat ominaispiirteet, jotka perustuvat rakennuksen käyttöhistoriaan. Korjaustöiden yhteydessä rakenteiden dokumentoinnilla onkin tärkeä rooli, jotta eri aikakausina tehtyt muutokset osataan myöhemmin ajoittaa.

Arvokohteiden korjaustyöprojektit vaativat aina laajemman asiantuntijaryhmän taakseen. Suunnittelijat yhdessä tilaajan, viranomaisten ja erilaisten selvitystyöntekijöiden kanssa keskustelevalle kuhunkin korjauskohteeseen soveltuvista korjausratkaisuista. Laajan asiantuntijaryhmän yhteistyö on arvokohteiden korjausprojekteissa erityisen tärkeää jo heti hankesuunnitteluvaiheessa.

## LÄHTEET

- [1] Arkkitehtitoimisto Livady, Sipoon vanhan kirkon kattorakenne: Keskiaikaisen kattorakenteen historiallinen ja tekninen selvitys, TKK, 2008.
- [2] Arkkitehtitoimisto Livady, Sipoon vanhan kirkon kattorakenne, osa 2, raportti vuonna 2009 tehdyistä korjaustöistä, 2010.
- [3] Asp, G.E., Huonerakenteiden oppi 2 vihko, Puurakenteita, Turun Suomalainen Kirjapaino- ja Sanomalehti Oy, 1903.
- [4] Bajno, D., Bednarz, Lukasz J., Nowak, T., Preservation of the roof truss in the city hall of Opole (Poland): An analysis, ResearchGate, 2016.
- [5] Candelpergher, L., Piazza, M., Mechanics of traditional connections with metal devices in timber roof structures, WIT press, 2001. Saatavissa (viitattu 4.10.2016):  
<http://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/STR01/STR01040FU.pdf>
- [6] Centre Excellence Telč:in verkkosivut. Pilodynin koe. Saatavissa (viitattu 13.3.2017): <http://cet.arcchip.cz/laboratory-of-mobile-diagnostics-and-support-of-heritage-preser>
- [7] Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Vahvistettu 16.6.2014.
- [8] Eurokoodi 6. Muurattujen rakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: raudoitettuja ja raudoittamattomia muurattuja rakenteita koskevat yleiset säännöt. Vahvistettu 12.8.2013.
- [9] Finlexin verkkosivut. Saatavissa (viitattu 28.10.2016):  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20100498?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=Laki%20rakennusperinn%C3%B6n%20suojelemisesta>
- [10] Franke, S., Franke, B., X-Ray technology for the assessment of timber structures, 2013.
- [11] Gorse, C., Highfield, D., Refurbishment and Upgrading of Buildings, second edition, Taylor & Francis e-Library, 2009.
- [12] Halperin, Don A., Bible, G. Thomas, Principles of timber design for architects & builders, Wiley, 1994.

- [13] Harte, Annette M., Dietsch, P.(editors), Reinforcement of Timber Structures, A state-of-the-art report, COST European Cooperation in Science and Technology, Aug 2015.
- [14] Helsingin karttapalvelun verkkosivut. Saatavissa (viitattu 5.2.2017): <http://kartta.hel.fi/>
- [15] Hoath, J., Repairing Historic Roof Timbers, Cathedral Communications Limited. Saatavissa (viitattu 16.8.2016): <http://www.buildingconservation.com/articles/rooftimber/rooftimber.htm>
- [16] Huttunen, M., Porvoon tuomiokirkon sakastin kattorakenteet, Puu-lehti 1/2008, Puuinfo Oy. Saatavissa (viitattu 1.11.2016): <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/puulehti/puu-lehti-12008/puulehti081www.pdf>
- [17] Icopal diffuusioavoimet aluskatteet. Saatavissa (viitattu 8.11.2016): <http://www.icopal.fi/Tuotteet/Jyrkat%20katot/Aluskatteet-%20ja%20kermit%20jyrkille%20katoille/Diffuusioavoimet%20aluskatteet.aspx>
- [18] Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy, kuntotutkimusaineisto, Helsinki. Saatavissa rajoitetusti.
- [19] Johansson, M., Suikki, J., Non-destructive evaluation of timber floors structure at Skansen Lejonet, Master's thesis, Chalmers University of Technology, 2013. Saatavissa (viitattu 19.8.2016): <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/181157/181157.pdf>
- [20] Jokelainen, J., Hirsirakenteiden merkitys asema-arkkitehtuurille 1860–1950, Oulun yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Arkkitehtuurin osasto, Oulu University Press, 2005.
- [21] Kattoliitto ry, Toimivat katot 2013, Kattoliitto. Saatavissa (viitattu 5.2.2017): [http://www.kattoliitto.fi/files/504/Toimivat\\_Katot\\_2013\\_reduced\\_size\\_.pdf](http://www.kattoliitto.fi/files/504/Toimivat_Katot_2013_reduced_size_.pdf)
- [22] Keinänen, W., Rakennusopin tietokirja, II osa, puurakenteet ja katon kattaukset, 1925.
- [23] KorjausRYL, Esiselvitykset ja purkaminen, Rakennustieto Oy, 2016.
- [24] Larsen, Knut E., Marstein, N., Conservation of Historic Timber Structures: An ecological approach, Butterworth-Heinemann, 2016.
- [25] Levón, M. (toim.), Keksintöjen kirja: Puu, sen käyttö ja jalostus, WSOY, 1933.
- [26] Liimapuukäsikirja, Osa 2, Suomen liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo ry, 2015.

- [27] Manninen, M., Aleksanterin teatteri, Rakennushistoriaselvitys, Arkkitehtitoimisto Schulman Oy, 2015. Saatavissa (viitattu 22.8.2016): [http://www.senaatti.fi/filebank/3572-2015\\_Schulman\\_Hki\\_Aleksanterin\\_teatteri\\_RHS.pdf](http://www.senaatti.fi/filebank/3572-2015_Schulman_Hki_Aleksanterin_teatteri_RHS.pdf)
- [28] Mitchell, G., Carpentry and Joinery, Third Edition, Continuum, 1999..
- [29] Modena, C., Lourenco P.B., Roca P., Structural analysis of historical constructions: Possibilities of numerical and experimental techniques, Vol 2, Taylor & Francis Group plc, 2005.
- [30] Museoviraston verkkosivut. Saatavissa (viitattu 28.10.2016): [http://www.nba.fi/fi/kulttuuriymparisto/rakennusperinto/rakennusten\\_suojelu](http://www.nba.fi/fi/kulttuuriymparisto/rakennusperinto/rakennusten_suojelu)
- [31] Neuvonen, P.(toim.), Kerrostalot 1880–2000. Arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjausrakentaminen, Rakennustieto Oy, 2006.
- [32] Nowak, T., Diagnosis of timber structures using non-destructive techniques, COST, 2013.
- [33] Nyman, T., Asbesti- ja PAH-yhdistepitoisilla pintakäsittelytuotteilla käsitellyt peltikatot, Insinööritoimisto, Metropolia Ammattikorkeakoulu, 2015.
- [34] Onnettomuustutkintakeskus, kooste talven 2010–2011 rakenneaurioista. Saatavissa (viitattu 1.3.2017): [http://www.turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2011/d12011y\\_tutkintaselostus/d12011y\\_tutkintaselostus.pdf](http://www.turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2011/d12011y_tutkintaselostus/d12011y_tutkintaselostus.pdf)
- [35] Osmos Canadian verkkosivut. Saatavissa (viitattu 12.12.2016): <http://www.osmos-canada.com/en/>
- [36] Palma, P., Cruz, H., Mechanical Behaviour of Traditional Timber Carpentry Joints in Service Conditions – Results of Monotonic Tests, ICOMOS IWC, 2007. Saatavissa (viitattu 4.10.2016): <http://iwc.icomos.org/16/palma.pdf>
- [37] Piazza, M., Department of Mechanical and Structural Engineering, Trento University, Journal of Building Appraisal, Vol 3, 2008.
- [38] Puuinfo Oy, Puuhallin rakenteet, Esisuunnittelu ja valintaperusteet, 2009. Saatavissa (viitattu 12.3.2017): <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/puuhallin-rakenteet-esisuunnittelu-ja-valintaperusteet/090202-puuhallin-rakennesuunnittelu.pdf>

- [39] Puurakenteiden halkeilun hallinta, opas, VTT, 2006. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/halkeilu\\_2006.pdf](http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/halkeilu_2006.pdf)
- [40] Rakentajain kalenteri 2016, Rakennustieto Oy, 2016.
- [41] Restaurointi-S verkkosivut. Sipoon vanhan kirkon restaurointi. Saatavissa (viitattu 31.3.2017): [http://whm14.louhi.net/~restauro/?page\\_id=64](http://whm14.louhi.net/~restauro/?page_id=64)
- [42] RIL 246-2008 (2008), Puu- ja teräsrakenteisten hallien kuntotarkastus, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2008.
- [43] RIL 267-2015, Käyttäjälähtöinen älyrakennus – suunnittelu, rakentaminen, käyttö ja ylläpito, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2015.
- [44] RIL 269-2015 (2015), Rakennusten rakenteellisen turvallisuuden tarkastusohje, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2015.
- [45] RT-kortti, Puutavara. Sahattu, höylätty ja jatkojalosteet, Rakennustieto Oy, 2009.
- [46] Sahlberg, M.(toim.), Talon tarinat-Rakennushistorian selvitysopas, Museovirasto, Rakennushistorian osasto, 2010. Saatavissa (viitattu 20.12.2016): <http://www.nba.fi/fi/File/1112/talon-tarinat-opas.pdf>
- [47] Savitaipaleen kirkko. Savitaipaleen kunnan verkkosivut. Saatavissa (viitattu 14.3.2017): <http://www.savitaipale.fi/matka/nahtava/kirkko.php>
- [48] SFS-EN 338. Structural timber. Strength classes. Vahvistettu 25.1.2010.
- [49] Siikanen, U., Puurakentaminen, Rakennustieto, 2008.
- [50] Sipoon vanhan kirkon historiaa. Sipoon suomalaisen seurakunnan verkkosivut. Saatavissa (viitattu 31.3.2017): <http://www.sipoonsuomalainenseurakunta.fi/articles/1771/>
- [51] Structural Timber Education Programme, STEP 1, Puurakenteet: suunnitteluperusteet, materiaaliominaisuudet, rakenneosat ja liitokset, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1996.
- [52] Structural Timber Education Programme, STEP 2, Puurakenteet: rakennedetaljit ja rakenteet, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1998.
- [53] Tampone, G., Mechanical Failures of the Timber Structural Systems, ICOMOS IWC, 2007.
- [54] Kondenssisuojattu aluskate. Tectisin verkkosivut. Saatavissa (viitattu 5.2.2017): <http://www.tectis.fi/fi/index.php/tuotteet/aluskatteet>

- [55] Tähtinen, K., Aalto, L., Pietarinen, V-M., Lappalainen, S., Holopainen, R., Palomäki, E., Kuokkanen, J., Arvorakennusten käytettävyys ja hyvät korjauskäytännöt, Työterveyslaitos, 2013. Saatavissa (viitattu 19.12.2016): <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/110650/Arvo.pdf?sequence=1>
- [56] Vuorinen, T., Jantunen, J., Järeän sahatavaran käyttö rakennuksissa, rakennejärjestelmät ja liitokset, Maatalouden tutkimuskeskus, 1997. Saatavissa (viitattu 3.2.2017): <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/438854>
- [57] Sipoon vanhan kirkon julkisivukuva. Wikipedia. Saatavissa (viitattu 31.3.2017): [https://fi.wikipedia.org/wiki/Sipoon\\_vanha\\_kirkko](https://fi.wikipedia.org/wiki/Sipoon_vanha_kirkko)
- [58] Winter, S., Eurocodes background and applications, workshop material, 2008. Saatavissa (viitattu 27.10.2016): <http://www.eurocodes.fi/1995/paasivu995/sahkoinen1995/EN%201995.pdf>
- [59] Ympäristöministeriön verkkosivut. Rakentamismääräyskokoelma. Saatavissa (viitattu 13.2.2017): <http://www.ym.fi/Rakentamismaarayskokoelma>
- [60] Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. Saatavissa (viitattu 28.10.2016): [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Elinymparisto\\_ja\\_kaavoitus/Elinymparisto/Kulttuuriymparisto/Kulttuuriympariston\\_hoidon\\_keinot/Rakennussuojelu](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Elinymparisto_ja_kaavoitus/Elinymparisto/Kulttuuriymparisto/Kulttuuriympariston_hoidon_keinot/Rakennussuojelu)



## LIITE A

Aleksanterin teatteri, katsomon kattokannattajien  
kuormitukset

## ALEKSANTERIN TEATTERI, KATSOMON KATTOKANNATTAJIEN KUORMITUKSET

### 1. Lähtötiedot

Rakenteiden omat painot on laskettu rakenneavauksista saatujen materiaali- ja kerrospaksuushavaintojen perusteella.

Mitoituksessa käytetään seuraamusluokkaa CC3 (teatterit).

Laskelmissa on käytetty vanhojen kattoristikoiden kuormitusleveytenä  $L=2,0$  m.

Uusien kattokannattajien kuormitusleveydet:

K-1	2122	mm
K-2	1658	mm
K-3	2017	mm
K-4	1902	mm
K-5	1304	mm
K-6	1834	mm
K-7	1861	mm
K-8	1519	mm
K-9	1591	mm

Vanhojen kattoristikoiden tarkastelut sahatavaran lujuusluokkien C24-C40 mukaan.

Uudet kannattajat Kerto-S.

$\gamma_M$	1,2		kertopuu
$k_{mod}$	0,8		KL2, keskipitkä aikaluokka
$k_{c,90}$	1,0		
$b_{\perp}$	146	mm	tukileveys (kulmateräs)

$f_{m,k}$	44	$N/mm^2$	
$f_{m,d}$	29,3	$N/mm^2$	$=k_{mod}f_{m,k}/\gamma_M$
$f_{v,k}$	4,1	$N/mm^2$	
$f_{v,d}$	2,7	$N/mm^2$	$=k_{mod}f_{v,k}/\gamma_M$
$f_{c,0,k}$	35,0	$N/mm^2$	
$f_{c,0,d}$	23,3	$N/mm^2$	

$E_{0,05}$	11600	$N/mm^2$
$f_{c,90,k}$	6,0	$N/mm^2$
$f_{c,90,d}$	4,0	$N/mm^2$

$$f_d = k_{mod}f_k/\gamma_M$$

Kannattajien koko valitaan vaihtuvien kuormitusleveyksien mukaan. Kannattajat kootaan yksittäisistä kertopuupalkeista  $b \times h = 51 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ . Mahdollisia poikkileikkauskokoja:

12 kpl, Palkki 612x300:	b	612	mm	kertopuu, $b_{ef}=b$
	$b_{ef}$	612	mm	
	h	300	mm	
14 kpl, Palkki 714x300:	b	714	mm	kertopuu, $b_{ef}=b$
	$b_{ef}$	714	mm	
	h	300	mm	
16 kpl, Palkki 816x300:	b	816	mm	kertopuu, $b_{ef}=b$
	$b_{ef}$	816	mm	
	h	300	mm	
18 kpl, Palkki 918x300:	b	918	mm	kertopuu, $b_{ef}=b$
	$b_{ef}$	918	mm	
	h	300	mm	
20 kpl, Palkki 1020x300:	b	1020	mm	kertopuu, $b_{ef}=b$
	$b_{ef}$	1020	mm	
	h	300	mm	

## 2. Olemassa olevien kattoristikoiden kuormitukset

### 2.1. Kattoristikoiden omapaino

Laskentaohjelma (Robot Structural Analysis) laskee ristikoiden omapainon syötettyjen poikkileikkaus- ja materiaalitietojen mukaan. Sauvojen ja paarteiden poikkileikkauskokona käytettiin  $b \times h = 250 \times 225 \text{ mm}^2$ . Puun tiheys lujuusluokan C24 mukaan.

### 2.2. Vesikaton hyötykuorma

Laskelmissa vesikaton hyötykuormana on käytetty arvoa  $0,4 \text{ kN/m}^2$  (luokka H: vesikatot).

### 2.3. Ullakon hyötykuorma

Laskelmissa ullakon hyötykuormana on käytetty arvoa  $2,5 \text{ kN/m}^2$ .

### 2.4. Lumikuorma

Lumikuormana on käytetty lumikuorman arvoa katolla Helsingissä:  $\mu_1 \cdot s_k = 0,8 \cdot 2,5 \text{ kN/m}^2 = 2,0 \text{ kN/m}^2$ .

## 2.5. Yläpohjarakenteiden neliöpaino (vesikaton omapaino)

Rakennekerros	Kerrospaksuus [mm]	Tilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]	Omapaino [kN/m <sup>2</sup> ]
Peltikate	0,6	77	0,05
Koolaukset	70	5,0	0,35
2-kert. huopa	10	7,5	0,08
Eriste*	190	3,1	0,59
Huopa	5	7,5	0,04
Bitumi	1	14	0,01
Pontatut lankut	65	5,0	0,33
Σ			<b>1,44</b>

\* Punnittu muju 312 kg/m<sup>3</sup>

## 2.6. Ullakon lattiarakenteen neliöpaino

Rakennekerros	Kerrospaksuus [mm]	Tilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]	Omapaino [kN/m <sup>2</sup> ]
Lattialankku	55	5	0,28
Rakennusjäte	100	14	1,40
Poltettu tiili	70	18	1,26
Rossilankku	55	5	0,28
Aluslaudoitus	28	5	0,14
Tikkurappaus	30	15	0,45
Σ			<b>3,80</b>

## 3. Uusien kannattajien kuormitukset

### 3.1. Kattokannattajien omapaino

Laskentaohjelma (Robot Structural Analysis) laskee kannattajien omapainon syötettyjen poikkileikkaus- ja materiaalitietojen mukaan.

### 3.2. Vesikaton hyötykuorma

Laskelmissa vesikaton hyötykuormana on käytetty arvoa 0,4 kN/m<sup>2</sup> (luokka H: vesikatot).

### 3.3. Lumikuorma

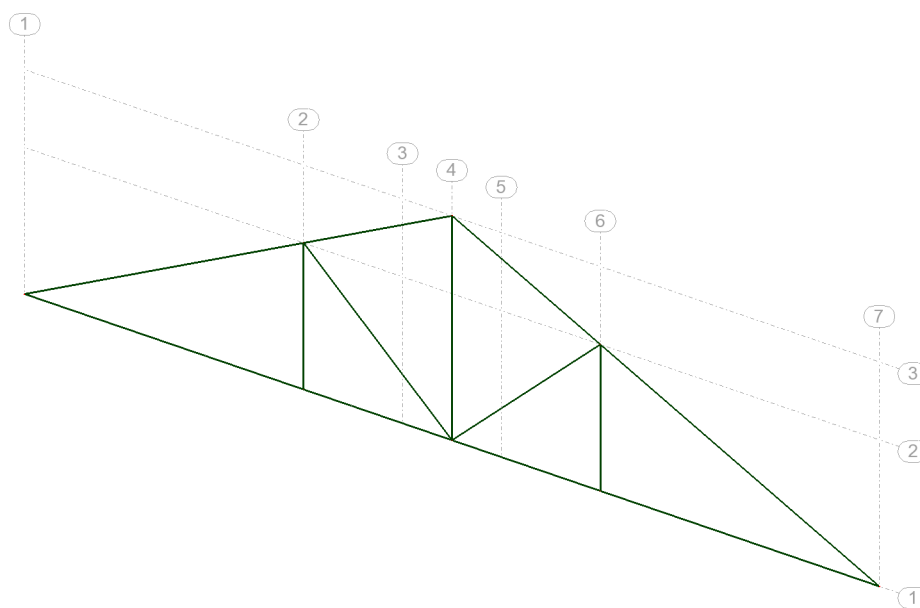
Lumikuormana on käytetty lumikuorman arvoa katolla Helsingissä:  $\mu_1 \cdot s_k = 0,8 \cdot 2,5 \text{ kN/m}^2 = 2,0 \text{ kN/m}^2$ .

### 3.4. Yläpohjarakenteiden neliöpaino (vesikaton omapaino)

Uusilla kattokannattajilla kannatetaan yläpohjarakenteiden oma paino, joka on sama kuin vanhoilla ristikoilla:  $g_k = 1,44 \text{ kN/m}^2$ .

## LIITE B

Aleksanterin teatteri, katsomon vanhan kattoristikon  
rakenneanalyysi (Robot Structural Analysis)

**Structure View****Data - Nodes**

Node	X (m)	Z (m)	Support code	Support
1	0,0	0,0	xxf	Pinned
2	9,27	3,66		
3	18,53	0,0	fxf	Support_1
4	9,27	0,0		
5	6,05	2,39		
7	12,48	2,39		
8	12,48	0,0		
9	6,05	0,0		

**Data - Bars**

Bar	Node 1	Node 2	Section	Material	Length (m)	Gamma (Deg)	Type
1	1	2	BEAM 250x225	C24	9,96	0,0	Simple bar

Bar	Node 1	Node 2	Section	Material	Length (m)	Gamma (Deg)	Type
2	2	3	BEAM 250x225	C24	9,96	0,0	Simple bar
3	1	3	BEAM 250x225	C24	18,53	0,0	Simple bar
4	2	4	BEAM 250x225	C24	3,66	0,0	Simple bar
5	5	4	BEAM 250x225	C24	4,01	0,0	Simple bar
6	7	4	BEAM 250x225	C24	4,01	0,0	Simple bar
7	7	8	BEAM 250x225	C24	2,39	0,0	Simple bar
8	5	9	BEAM 250x225	C24	2,39	0,0	Simple bar

## Loads - Cases

Case	Label	Case name
1	DL1	DL1
2	LL1	Vesikaton hyötykuorma
3	LL2	Ullakon hyötykuorma
4	LL3	Lumikuorma
5	SN2	Vesikaton omapaino
6	DL3	Ullakon lattian paino
7		$ULS/1=1*1.49 + 5*1.49 + 6*1.49$
8		$ULS/2=1*0.90 + 5*0.90 + 6*0.90$
9		$ULS/3=1*1.27 + 5*1.27 + 6*1.27 + 2*1.65 + 3*1.65 + 4*1.15$
10		$ULS/4=1*1.27 + 5*1.27 + 6*1.27 + 2*1.65 + 3*1.65$
11		$ULS/5=1*1.27 + 5*1.27 + 6*1.27$
12		$ULS/6=1*0.90 + 5*0.90 + 6*0.90 + 2*1.65 + 3*1.65 + 4*1.15$
13		$ULS/7=1*0.90 + 5*0.90 + 6*0.90 + 2*1.65 + 3*1.65$
14		$ULS/8=1*0.90 + 5*0.90 + 6*0.90$
15		$ULS/9=1*1.27 + 5*1.27 + 6*1.27 + 4*1.65$
16		$ULS/10=1*0.90 + 5*0.90 + 6*0.90 + 4*1.65$

Case	Nature	Analysis type
1	Structural	Static - Linear
2	Luokka H	Static - Linear
3	Luokka A	Static - Linear
4	Lumikuorma sk<2.75 kN/m2	Static - Linear
5	Structural	Static - Linear
6	Structural	Static - Linear
7	Structural	Linear Combination
8	Structural	Linear Combination
9	Structural	Linear Combination
10	Structural	Linear Combination
11	Structural	Linear Combination
12	Structural	Linear Combination
13	Structural	Linear Combination
14	Structural	Linear Combination
15	Structural	Linear Combination
16	Structural	Linear Combination

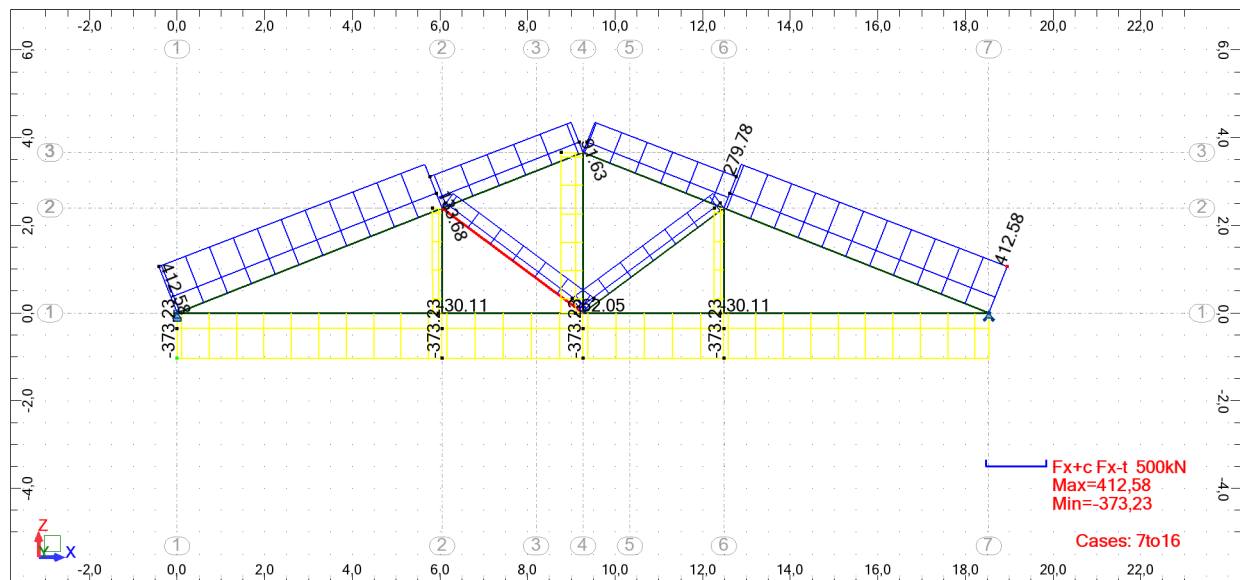
## Member Forces ULS: envelope

Bar	FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)
<b>1 / MAX</b>	412,58	30,25	0,09
Node	1	1	2
Case	9 (C)	15 (C)	4
<b>1 / MIN</b>	8,50	-8,60	-19,54
Node	2	2	1
Case	1	15 (C)	15 (C)
<b>2 / MAX</b>	412,58	8,60	0,09
Node	3	2	2
Case	9 (C)	15 (C)	4
<b>2 / MIN</b>	8,50	-30,25	-19,54
Node	2	3	3
Case	1	15 (C)	15 (C)
<b>3 / MAX</b>	-10,83	3,20	19,54
Node	3	3	3
Case	1	15 (C)	15 (C)
<b>3 / MIN</b>	-373,23	-3,20	-0,05
Node	1	1	1
Case	9 (C)	15 (C)	6
<b>4 / MAX</b>	-5,28	0,0	0,0
Node	4	2	2
Case	1	1	1
<b>4 / MIN</b>	-180,53	0,0	0,0
Node	2	2	2
Case	9 (C)	1	1
<b>5 / MAX</b>	151,67	0,46	0,0
Node	4	5	5
Case	9 (C)	7 (C)	1
<b>5 / MIN</b>	3,36	-0,46	0,0
Node	5	4	5
Case	1	7 (C)	1
<b>6 / MAX</b>	151,67	0,46	0,0
Node	4	7	7
Case	9 (C)	7 (C)	1
<b>6 / MIN</b>	3,36	-0,46	0,0
Node	7	4	7
Case	1	7 (C)	1
<b>7 / MAX</b>	-0,50	0,0	0,0
Node	7	7	7
Case	2	1	1
<b>7 / MIN</b>	-79,74	0,0	0,0
Node	7	7	7
Case	9 (C)	1	1
<b>8 / MAX</b>	-0,50	0,0	0,0
Node	5	5	5
Case	2	1	1



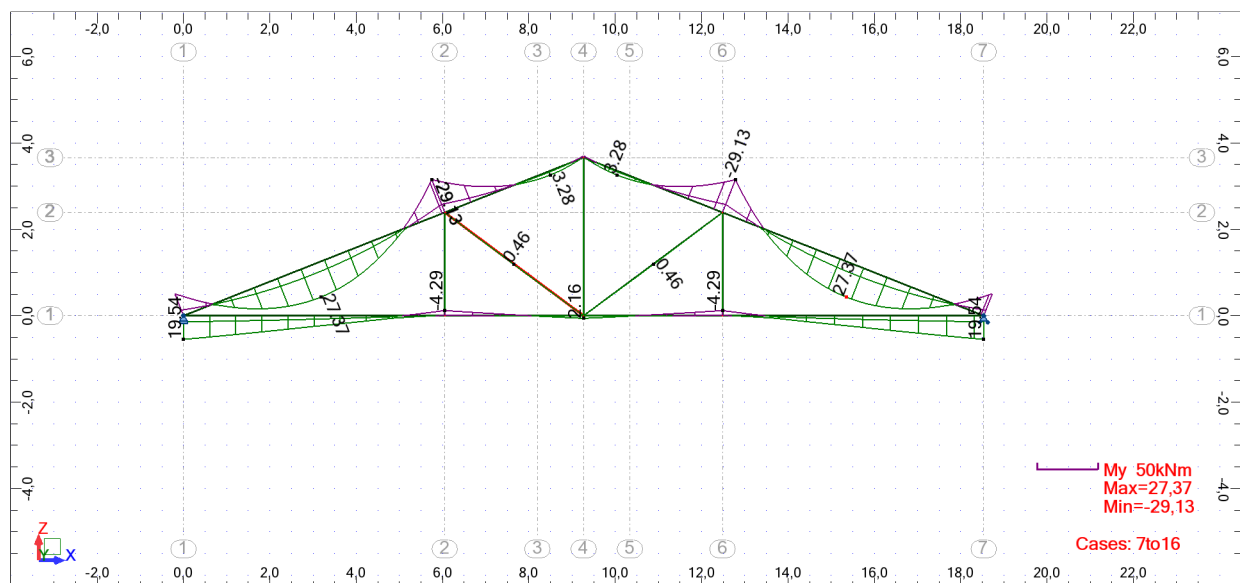
Bar	FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)
8 / MIN	-79,74	0,0	0,0
Node	5	5	5
Case	9 (C)	1	1

### FX combinations



10/04/17 10:11

### MY combinations



10/04/17 10:11

## LIITE C

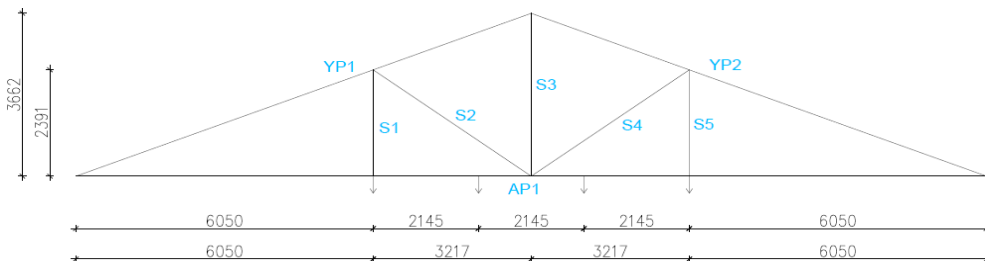
Aleksanterin teatteri, katsomon vanhan kattoristikon  
sauvojen kestävyystarkastelu

## KATSOMON VANHAN RISTIKON SAUVOJEN KESTÄVYYDET

### 1. Lähtötiedot

#### 1.1 Sauvojen rasiutukset

Sauvojen rasiutukset saadaan laskentaohjelmasta (Robot Structural Analysis). Rasiutusten laskenta suoritetaan yksinkertaistetulla rakennemallilla.



Sauva	Sauvan leveys b [mm]	Sauvan korkeus h [mm]	Taivutusmomentti [kNm]	Veto [kN]	Puristus [kN]
YP1	250	270	29,1	-	412,6
YP2	250	270	29,1	-	412,6
AP1	250	225	19,5	373,2	-
S1	225	225	-	79,7	-
S2	250	220	0,46*	-	151,7
S3	225	225	-	180,5	-
S4	250	220	0,46*	-	151,7
S5	225	225	-	79,7	-

\*Sauvojen S2 ja S4 taivutusmomentti johtuu omasta painosta. Sauvojen taivutusrasitusta ei huomioida seuraavissa laskelmissa.

Materiaaliominaisuudet, sahatavara C24 / C30 / C40

Lujuus/jäykkyys	C24 [N/mm <sup>2</sup> ]	C30 [N/mm <sup>2</sup> ]	C40 [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{c,0,k}$	21	23	26
$f_{m,k}$	24	30	40
$f_{t,0,k}$	14	18	24
$E_{0,05}$	7400	8000	9400

$$k_{mod} = 0,8$$

$$\gamma_M = 1,4$$

#### 1. Puristuskestävyys (nurjahdus)

Sauva	Nurjahduspituus $L_c$ [mm]	Hoikkuus [mm]	Muunnettu hoikkuus $\lambda_y$	Suhteellinen hoikkuus $\lambda_{rel,y}$ , C24:	Suhteellinen hoikkuus $\lambda_{rel,y}$ , C30:	Suhteellinen hoikkuus $\lambda_{rel,y}$ , C40:	Nurjahduskerroin C24:	Nurjahduskerroin C30:	Nurjahduskerroin C40:
YP1	6505	77,9	83	1,42	1,43	1,40	0,42	0,41	0,43
YP2	6505	77,9	83	1,42	1,43	1,40	0,42	0,41	0,43
S2	4009	63,5	63	1,07	1,08	1,06	0,64	0,63	0,65
S4	4009	63,5	63	1,07	1,08	1,06	0,64	0,63	0,65

Sauva	Puristus- jännitys $\sigma_{c,0,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Puristus- lujuus C24, $f_{c,0,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Puristus- lujuus C30, $f_{c,0,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Puristus- lujuus C40, $f_{c,0,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Käyttö- aste: C24	Käyttö- aste: C30	Käyttö- aste: C40
YP1	6,1	12,0	13,1	14,9	1,22	1,12	0,96
YP2	6,1	12,0	13,1	14,9	1,22	1,12	0,96
S2	2,8	12,0	13,1	14,9	0,36	0,33	0,29
S4	2,8	12,0	13,1	14,9	0,36	0,33	0,29

Todellisuudessa ristikon yläpaarre on tuettu nurjahdusta vastaan yläpuolisella ponttilaudoituksella.

## 2. Vetokestävyys

Sauva	Veto- jännitys $\sigma_{t,0,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Vetolujuus C24, $f_{t,0,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Vetolujuus C30, $f_{t,0,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Vetolujuus C40, $f_{t,0,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Käyttö- aste: C24	Käyttö- aste: C30	Käyttö- aste: C40
AP1	6,6	8,0	10,3	13,7	0,83	0,65	0,48
S1	1,6	8,0	10,3	13,7	0,20	0,15	0,11
S3	3,6	8,0	10,3	13,7	0,45	0,35	0,26
S5	1,6	8,0	10,3	13,7	0,20	0,15	0,11

## 3. Taivutuskestävyys

Sauva	Taivutus- jännitys $\sigma_{m,y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Taivutus- lujuus C24, $f_{m,y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Taivutus- lujuus C30, $f_{m,y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Taivutus- lujuus C40, $f_{m,y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Käyttö- aste: C24	Käyttö- aste: C30	Käyttö- aste: C40
YP1	9,6	13,7	17,1	22,9	0,70	0,56	0,42
YP2	9,6	13,7	17,1	22,9	0,70	0,56	0,42
AP1	9,2	13,7	17,1	22,9	0,67	0,54	0,40

## 4. Yhdistetty taivutus ja veto

Sauva	Taivutus- jännitys $\sigma_{m,y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Vetojännitys $\sigma_{t,0,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Käyttöaste: C24	Käyttö- aste: C30	Käyttö- aste: C40
AP1	9,2	6,6	1,50	1,18	0,89

## 5. Yhdistetty taivutus ja puristus

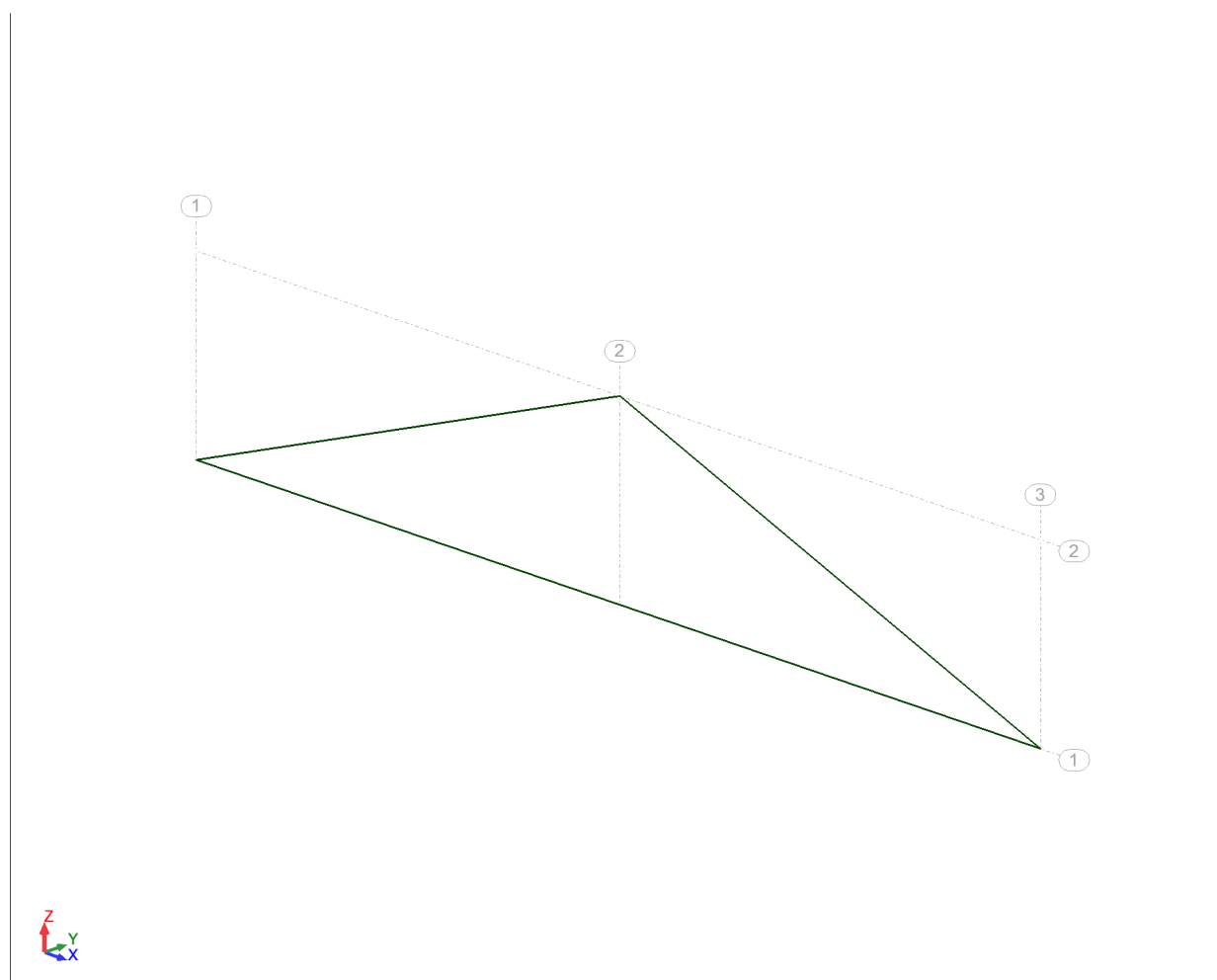
Sauva	Taivutus- jännitys $\sigma_{m,y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Puristus- jännitys $\sigma_{c,0,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Käyttöaste: C24	Käyttö- aste: C30	Käyttö- aste: C40
YP1	9,6	6,1	1,92	1,68	1,38
YP2	9,6	6,1	1,92	1,68	1,38

Todellisuudessa ristikon yläpaarre on tuettu nurjahdusta vastaan yläpuolisella ponttilaudoituksella.

## LIITE D

Aleksanterin teatteri, kehän K-1 rakenneanalyysi  
(Robot Structural Analysis)

## Structure View



## Data - Nodes

Node	X (m)	Z (m)	Support code	Support
1	0,0	0,0	xxf	Pinned
2	9,38	3,48		
3	18,70	0,0	fxf	Liukutuki

## Data - Bars

Bar	Node 1	Node 2	Section	Material	Length (m)	Gamma (Deg)	Type
1	1	2	Kerto-S 1020x300	KERTO S	10,01	0,0	Timber Beam
2	3	2	Kerto-S 1020x300	KERTO S	9,94	0,0	Timber Beam
3	1	3	Vetotanko d=28	S355	18,70	0,0	Simple bar

## Loads - Cases

Case	Label	Case name
1	DL1	DL 1
2	LL1	LL 1
3	DL2	Vesikattorakenteet
4	DL3	Lumikuorma
5		ULS/1=1*1.49 + 3*1.49
6		ULS/2=1*0.90 + 3*0.90
7		ULS/3=1*1.27 + 3*1.27 + 2*1.65 + 4*1.15
8		ULS/4=1*1.27 + 3*1.27 + 2*1.65
9		ULS/5=1*1.27 + 3*1.27
10		ULS/6=1*0.90 + 3*0.90 + 2*1.65 + 4*1.15
11		ULS/7=1*0.90 + 3*0.90 + 2*1.65
12		ULS/8=1*0.90 + 3*0.90
13		ULS/9=1*1.27 + 3*1.27 + 4*1.65
14		ULS/10=1*0.90 + 3*0.90 + 4*1.65
15		SLS:CHR/1=1*1.00 + 3*1.00 + 2*1.00 + 4*0.70
16		SLS:CHR/2=1*1.00 + 3*1.00 + 2*1.00
17		SLS:CHR/3=1*1.00 + 3*1.00
18		SLS:CHR/4=1*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00
19		SLS:FRE/5=1*1.00 + 3*1.00 + 4*0.40
20		SLS:FRE/6=1*1.00 + 3*1.00
21		SLS:QPR/7=1*1.00 + 3*1.00 + 4*0.20
22		SLS:QPR/8=1*1.00 + 3*1.00

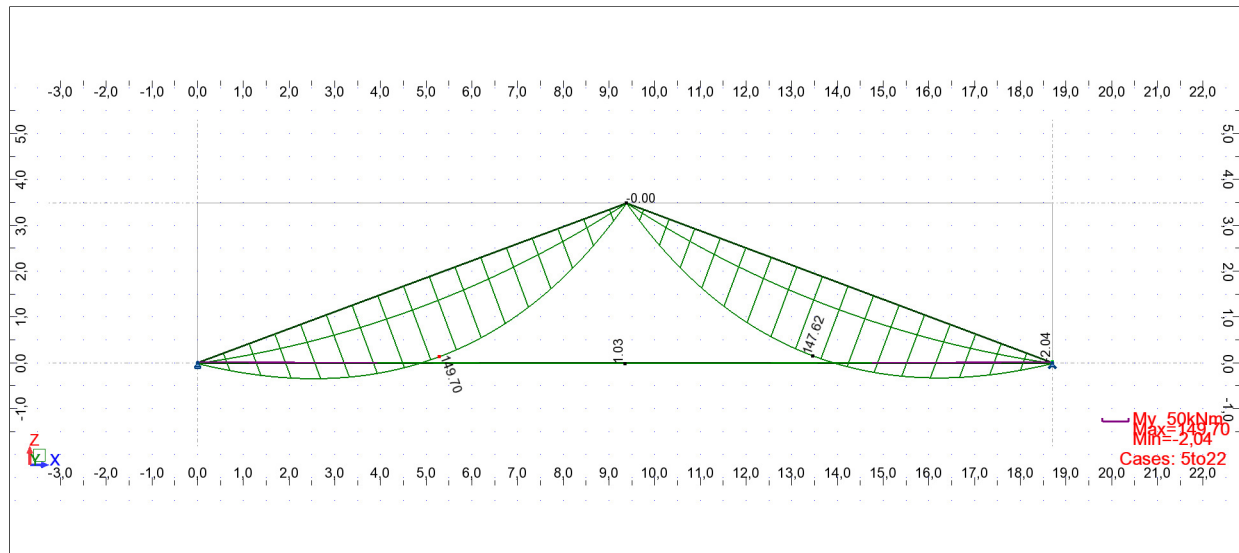
Case	Nature	Analysis type
1	Structural	Static - Linear
2	Luokka H	Static - Linear
3	Structural	Static - Linear
4	Lumikuorma sk<2.75 kN/m2	Static - Linear
5	Structural	Linear Combination
6	Structural	Linear Combination
7	Structural	Linear Combination
8	Structural	Linear Combination
9	Structural	Linear Combination
10	Structural	Linear Combination
11	Structural	Linear Combination
12	Structural	Linear Combination
13	Structural	Linear Combination
14	Structural	Linear Combination
15	dead	Linear Combination
16	dead	Linear Combination
17	dead	Linear Combination
18	dead	Linear Combination
19	dead	Linear Combination
20	dead	Linear Combination
21	dead	Linear Combination
22	dead	Linear Combination



## Member Forces ULS: envelope

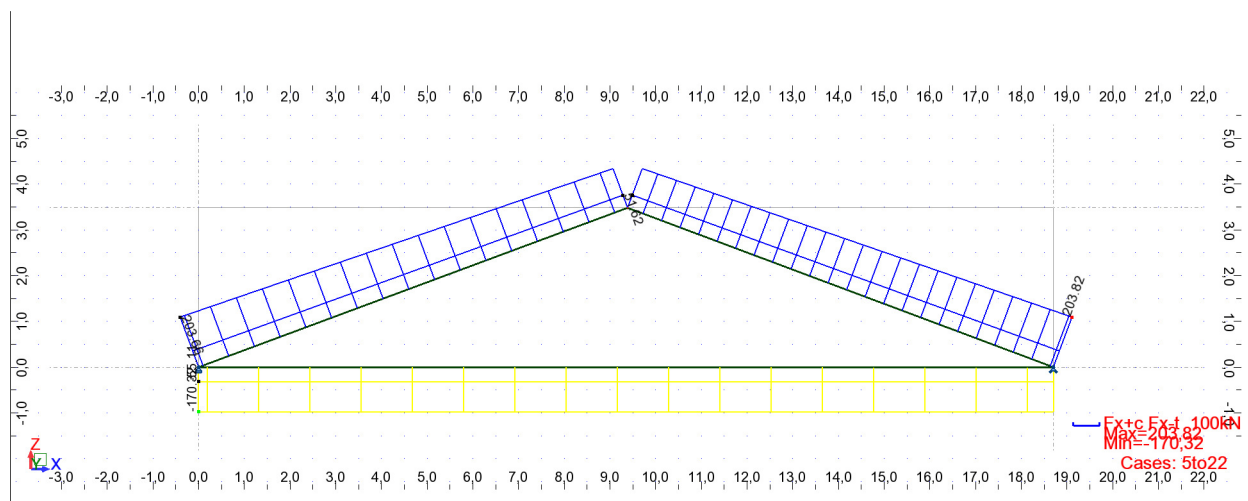
Bar	FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)
<b>1 / MAX</b>	203,66	59,30	2,04
Node	1	1	1
Case	13 (C)	13 (C)	5 (C)
<b>1 / MIN</b>	10,04	-59,65	-0,00
Node	2	2	1
Case	2	13 (C)	4
<b>2 / MAX</b>	203,82	58,86	2,04
Node	3	3	3
Case	13 (C)	13 (C)	5 (C)
<b>2 / MIN</b>	10,05	-59,21	-0,00
Node	2	2	3
Case	2	13 (C)	4
<b>3 / MAX</b>	-10,72	0,66	0,00
Node	1	1	1
Case	2	5 (C)	4
<b>3 / MIN</b>	-170,32	-0,66	-2,04
Node	1	3	3
Case	13 (C)	5 (C)	5 (C)

## MY combinations



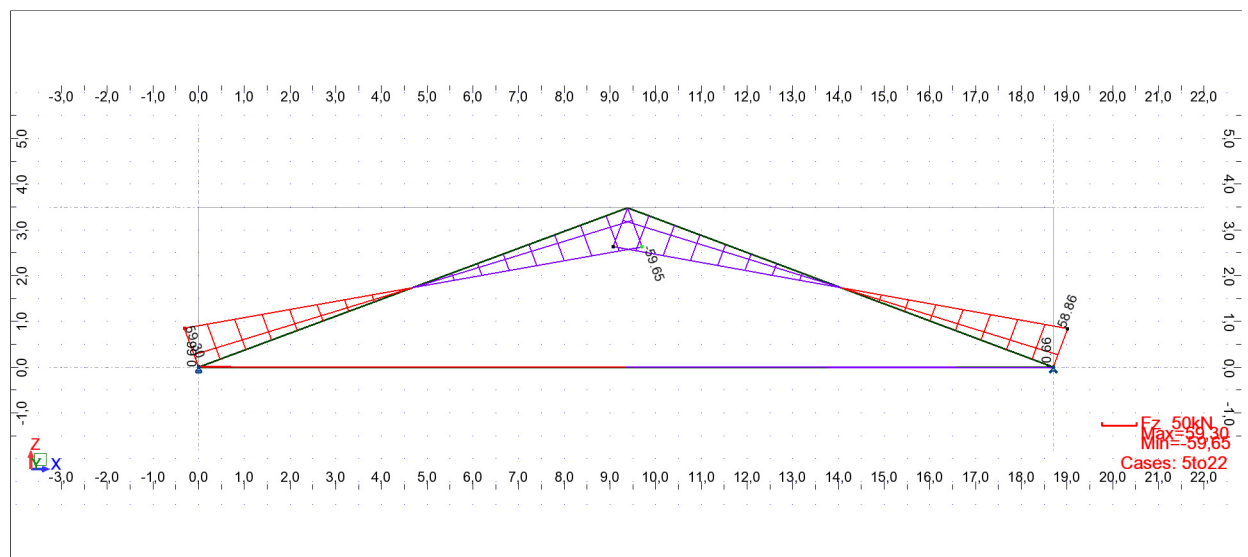
02/04/17 21:12

## FX combinations



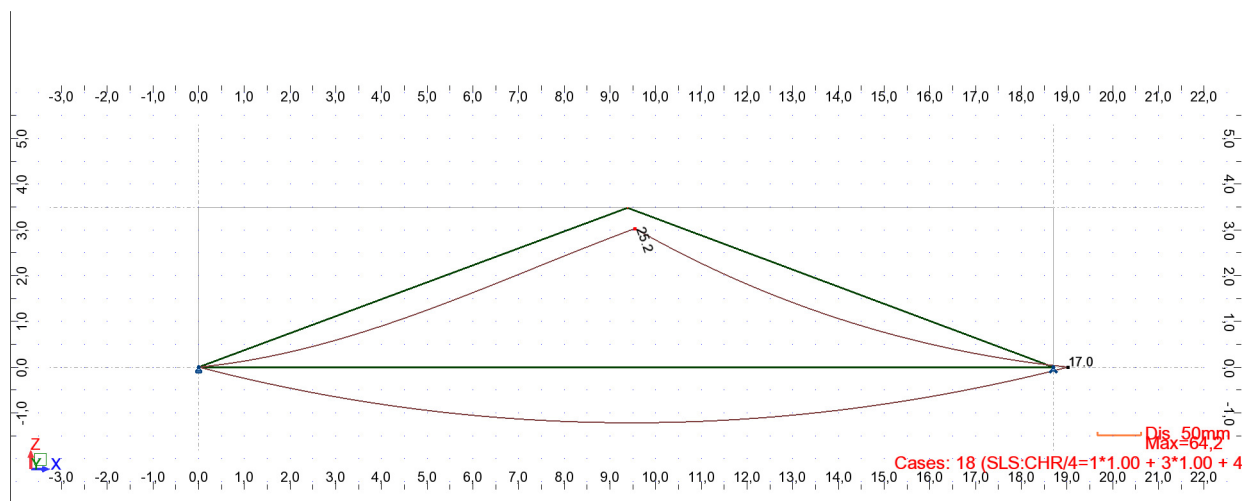
02/04/17 21:12

## FZ combinations



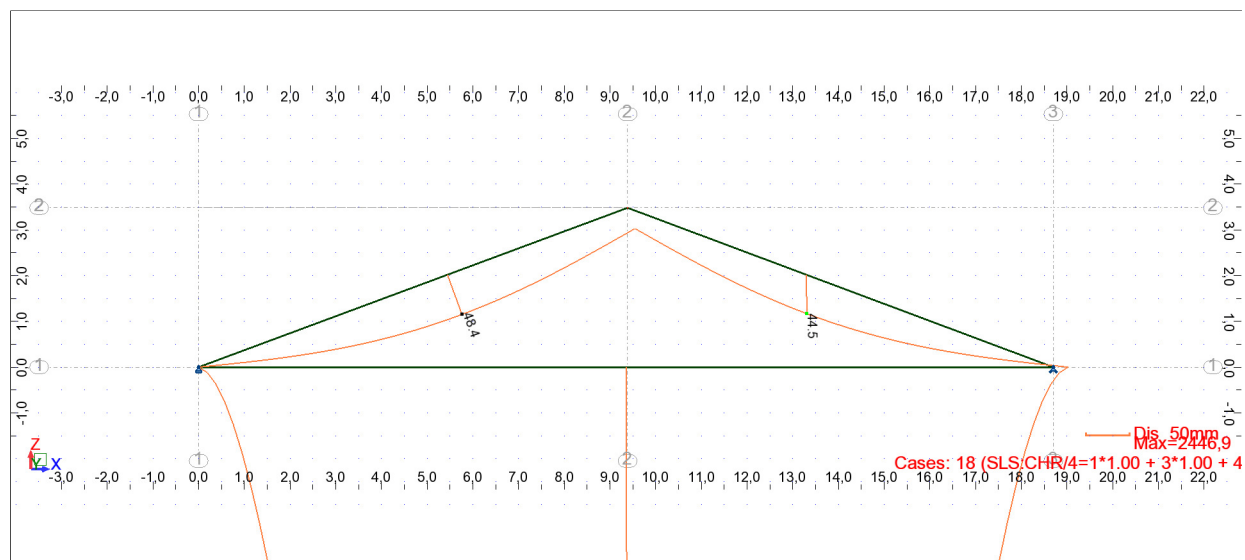
02/04/17 21:12

## Deformation



02/04/17 21:12

## Exact deformation



02/04/17 21:12

## LIITE E

Aleksanterin teatteri, katsomon uusien  
kattokannattajien sijainti

Aleksanterin teatteri, katsomon uudet kattokannattajat, 1:200

